

ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСЫ ЖӘНЕ КӨЛІКТІ АВТОМАТТАНДЫРУ / ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТА / ELECTRICAL POWER ENGINEERING AND TRANSPORT AUTOMATION

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23, Is. 1, Number 89 (2026). Pp. 7–28
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.001>
UDC 656.2

IOT SYSTEM MODELING AND SIGNAL PROCESSING ON END DEVICES

Zh.Zh. Kozhamkulova

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek
Daukeyev, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz

Zhadra Kozhamkulova — PhD, Associate Professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Kazakhstan
E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9780-9767>.

© Zh.Zh. Kozhamkulova

Abstract. The rapid development of Internet of Things (IoT) systems increases the demand for efficient digital signal processing performed directly on end devices. Limited computational resources, strict energy constraints, and low-latency requirements make the development of optimized signal processing methods a critical research challenge. In such systems, the problem of detecting and processing broadband signals under noisy conditions becomes particularly important. The aim of this study is to develop and analyze digital correlation processing and matched filtering methods suitable for implementation on resource-constrained IoT devices. The objectives of the research include analyzing existing signal detection and matched filtering techniques, developing algorithms with reduced computational complexity, and evaluating their performance through signal modeling and simulation. As a result of the research, an adapted digital correlation processing method based on normalization and computational optimization is proposed. Signal processing simulations were performed for various signal shapes, including rectangular and broadband signals, in the presence of additive noise. The results demonstrate that the proposed method provides reliable signal detection while significantly reducing computational load and processing delay compared to classical correlation-based approaches. In conclusion, the developed methods can be effectively applied in IoT systems, sensor networks, and radio engineering applications, ensuring a balance between detection accuracy and computational efficiency. The obtained results contribute to the advancement of digital signal processing techniques for end devices and form a foundation for further research in energy-efficient data processing algorithms.

Keywords: digital signal processing; matched filtering; signal detection; Internet of Things; correlation processing; broadband signals

For citation: Zh.Zh. Kozhamkulova. IoT System Modeling and Signal Processing on End Devices // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 7–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.001>.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

ИОТ ЖҮЙЕСІНІҢ МОДЕЛІН ЖӘНЕ СОҢҒЫ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДАҒЫ СИГНАЛДАРДЫ ӨНДЕУДІ ЗЕРТТЕУ

Ж.Ж. Кожамкулова

Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы,
Қазақстан.

E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz

Жадра Кожамкулова — PhD, қауымдастырылған профессор, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9780-9767>.

© Ж.Ж. Кожамкулова

Аннотация. Интернет заттары (IoT) жүйелерінің қарқынды дамуы деректерді тікелей соңғы құрылғыларда тиімді өңдеу қажеттілігін арттырып отыр. Есептеу ресурстарының шектеулілігі, энергия тұтынудың төмен деңгейіне қойылатын талаптар және минималды уақыттық кідірістер сигналдарды өңдеудің оңтайландырылған әдістерін әзірлеудің өзектілігін көрсетеді. Мұндай жүйелерде шу жағдайында кеңжолақты сигналдарды анықтау және өңдеу мәселесі ерекше маңызға ие. Бұл зерттеудің мақсаты – шектеулі аппараттық ресурстарға ие IoT соңғы құрылғыларында қолдануға арналған цифрлық корреляциялық өңдеу және келісілген фильтрация әдістерін әзірлеу және талдау. Зерттеу міндеттеріне сигналдарды анықтау мен келісілген фильтрацияның қолданыстағы әдістерін талдау, есептеу күрделілігі төмен алгоритмдерді әзірлеу және олардың тиімділігін модельдеу арқылы бағалау кіреді. Зерттеу нәтижесінде есептеу операцияларын оңтайландыру мен нормализацияға негізделген цифрлық корреляциялық өңдеудің бейімделген әдісі ұсынылды. Өртүрлі формадағы сигналдар, соның ішінде тікбұрышты және кеңжолақты сигналдар, аддитивті шу жағдайында модельденді. Алынған нәтижелер ұсынылған әдістің классикалық корреляциялық әдістермен салыстырғанда есептеу жүктемесін азайта отырып, сигналдарды сенімді анықтайтынын көрсетті. Қорытындылай келе, әзірленген әдістер IoT жүйелерінде, радиотехникалық және сенсорлық желілерде тиімді қолданылуы мүмкін. Зерттеу нәтижелері соңғы құрылғыларда цифрлық сигналдарды өңдеу саласындағы ғылыми білімді кеңейтіп, энергия үнемдейтін алгоритмдерді одан әрі дамытуға негіз қалайды.

Түйін сөздер: цифрлық сигналдарды өңдеу; келісілген фильтрация; сигналдарды анықтау; Интернет заттары; корреляциялық өңдеу; кеңжолақты сигналдар

Дәйексөздер үшін: Ж.Ж. Кожамкулова. IoT жүйесінің моделін және соңғы құрылғылардағы сигналдарды өңдеуді зерттеу // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 7–28 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.001>.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОТ-СИСТЕМЫ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НА КОНЕЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Ж.Ж. Кожамкулова

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы,
Казахстан.

E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz

Жадра Кожамкулова — PhD, ассоциированный профессор, Алматинский университет
энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан
E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9780-9767>.

© Ж.Ж. Кожамкулова

Аннотация. В условиях активного развития систем Интернета вещей (IoT) возрастает необходимость эффективной обработки цифровых сигналов непосредственно на конечных устройствах. Ограниченные вычислительные ресурсы, энергопотребление и требования к минимальным временным задержкам делают актуальной задачу разработки адаптированных методов цифровой обработки сигналов, обеспечивающих высокую точность при сниженной вычислительной сложности. Особое значение в таких системах приобретает задача обнаружения и корреляционной обработки широкополосных сигналов в условиях шума. Целью данного исследования является разработка и анализ методов цифровой корреляционной обработки и согласованной фильтрации сигналов, ориентированных на применение в конечных IoT-устройствах с ограниченными аппаратными ресурсами. В рамках работы поставлены следующие задачи: анализ существующих методов согласованной фильтрации и обнаружения сигналов; разработка алгоритмов с пониженной вычислительной сложностью; моделирование сигналов и оценка эффективности предлагаемых решений. В результате исследования предложен адаптированный метод цифровой корреляционной обработки, основанный на нормализации и оптимизации вычислительных операций. Проведено моделирование обработки сигналов различной формы, включая прямоугольные и широкополосные сигналы, в присутствии аддитивного шума. Полученные результаты показали, что предложенный метод обеспечивает надежное обнаружение сигналов при снижении вычислительных затрат и минимальных временных задержках по сравнению с классическими методами корреляции. В заключение отмечается, что разработанные методы могут быть эффективно применены в системах IoT, радиотехнических и сенсорных сетях, обеспечивая баланс между точностью обработки и вычислительной эффективностью. Полученные результаты расширяют возможности практической реализации цифровой обработки сигналов на конечных устройствах и создают основу для дальнейших исследований в области энергоэффективных алгоритмов обработки данных.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов; согласованная фильтрация; обнаружение сигналов; Интернет вещей; корреляционная обработка; широкополосные сигналы

Для цитирования: Ж.Ж. Кожамкулова. Моделирование IoT-системы и обработка сигналов на конечных устройствах // Промышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 22. No. 89. Стр. 7–28. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.001>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Развитие технологий Интернета вещей (IoT) в последние годы значительно расширило возможности мониторинга, управления и анализа физических процессов в промышленности, транспорте, умных городах и других прикладных областях. Основными элементами IoT-систем являются конечные устройства, состоящие из сенсоров, процессоров и коммуникационных модулей, обеспечивающие сбор, обработку и передачу данных. Несмотря на активное внедрение IoT, в научной литературе отмечается

недостаточная проработанность методов цифровой обработки сигналов непосредственно на конечных устройствах, ограниченных по вычислительным ресурсам и энергопотреблению.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности обработки данных на конечных IoT-устройствах при сохранении минимального объема передаваемой информации и обеспечения высокой точности детектирования событий. Существующие подходы, применяемые в радиолокации и гидроакустике, такие как согласованная фильтрация, обеспечивают оптимальное отношение сигнал/шум, но требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их прямое применение в IoT-устройствах.

Объект исследования — IoT-система, включающая сенсоры, процессоры и коммуникационные модули, осуществляющая сбор, обработку и передачу данных. Предмет исследования — методы цифровой корреляционной обработки сигналов на конечных IoT-устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Цель исследования — разработка эффективного метода цифровой обработки сигналов для детектирования событий различной формы на конечных IoT-устройствах с минимизацией объема передаваемых данных и задержки обработки.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- Провести анализ существующих методов корреляционной обработки сигналов и их применимости для IoT-устройств.
- Определить вычислительную сложность традиционных алгоритмов и предложить подходы к снижению объема вычислений.
- Разработать алгоритм нормализованной взаимной корреляции, адаптированный для работы на конечных устройствах с ограниченной разрядностью и частотой тактов.
- Смоделировать работу алгоритма на цифровой последовательности данных с различными типами сигналов и определить эффективность детектирования.
- Определить пороговые значения для эффективного разделения событий и минимизации ложных тревог.

Методы и подходы исследования включают аналитический обзор существующих алгоритмов цифровой обработки сигналов, математическое моделирование взаимной корреляционной функции, методы кусочно-линейной аппроксимации сигналов, а также моделирование алгоритмов на платформе MATLAB с использованием псевдослучайных цифровых последовательностей.

Гипотеза исследования состоит в том, что применение адаптированного метода согласованной фильтрации с нормализацией и упрощением вычислительных операций позволяет реализовать эффективное детектирование сигналов различной формы непосредственно на конечных IoT-устройствах, обеспечивая минимальную задержку и сокращение объема передаваемых данных.

Результаты исследования имеют теоретическую значимость, так как дополняют существующие представления о цифровой обработке сигналов в ограниченных вычислительных средах, и практическую ценность, так как могут быть использованы в разработке промышленных, транспортных и умных городских систем, требующих высокой точности измерений при минимальных ресурсах конечного устройства.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются конечные устройства Интернета вещей (IoT), включающие сенсоры, процессоры и коммуникационные модули, осуществляющие сбор, цифровую обработку и передачу данных.

Качественная характеристика материалов:

- Сенсоры — устройства, измеряющие физические величины (температура, вибрация, давление и др.) с последующим преобразованием сигнала в цифровую форму;
- Процессоры — микроконтроллеры (MCU), цифровые сигнальные процессоры

(DSP) и программируемые логические интегральные схемы (FPGA);

- Коммуникационные модули — беспроводные (Wi-Fi, ZigBee, LoRa) и проводные интерфейсы передачи данных;

- Данные — цифровые последовательности отсчетов (8–16 бит), имитирующие реальные измерения с сенсоров; включают сигналы треугольной и прямоугольной формы, а также случайные шумовые компоненты.

Количественная характеристика:

- Длина моделируемых цифровых последовательностей данных — до 10^7 отсчетов;
- Разрядность сигналов — 8 бит;
- Частота дискретизации — определяемая параметрами АЦП, $SR = 1\text{--}10$ кГц (в зависимости от типа сенсора и требуемой точности);

- Объем моделируемого трафика на конечном устройстве — до десятков тысяч отсчетов в секунду.

- Используемые материалы позволили воспроизвести реальные условия работы IoT-устройств и оценить эффективность предложенного метода цифровой корреляционной обработки сигналов.

Вопросы исследования:

Насколько эффективен метод согласованной фильтрации при реализации на конечных IoT-устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами?

- Как влияют тип и форма сигналов на показатели корреляции и вероятность правильного детектирования событий?

- Каким образом можно снизить вычислительную сложность алгоритмов корреляционной обработки без потери точности?

- Какое пороговое значение корреляции (ТН) обеспечивает оптимальное разделение событий и минимизацию ложных тревог?

Гипотеза исследования: адаптированный метод цифровой согласованной фильтрации с нормализацией и упрощенными вычислительными операциями позволяет реализовать эффективное детектирование сигналов различной формы на конечных IoT-устройствах, обеспечивая минимальное количество передаваемых данных и задержку обработки, даже при ограниченной вычислительной мощности процессора.

Этапы исследования:

Аналитический этап: изучение существующих методов цифровой корреляционной обработки сигналов, их вычислительной сложности и применимости для IoT-устройств.

- Разработка алгоритма: создание адаптированной модели цифровой корреляционной обработки, включающей нормализацию и упрощенные вычислительные операции для конечного устройства.

- Моделирование данных: генерация псевдослучайных цифровых последовательностей с включением сигналов различной формы (треугольной и прямоугольной) и шумовых компонентов.

- Реализация алгоритма: программная реализация предложенного метода на платформе MATLAB для моделирования работы на конечном устройстве.

- Анализ результатов: вычисление взаимной корреляции, определение максимального значения сигнала, проверка порогового значения ТН и оценка эффективности детектирования.

Сравнительный анализ: оценка вычислительной сложности предложенного метода по сравнению с методами прямой корреляции, подапертур и кодовых скользящих сумм.

Следующие методы исследования были использованы в статье:

- Цифровая корреляционная обработка сигналов: использование нормализованной взаимной корреляционной функции для детектирования событий различной формы.

- Методы математического моделирования: генерация цифровых последовательностей, аппроксимация сигналов кусочно-линейными формами и

вычисление корреляции с учетом задержки.

- Компьютерное моделирование: реализация алгоритмов на MATLAB, оценка максимальных значений корреляции и эффективности пороговой фильтрации.

- Сравнительный анализ: анализ вычислительной сложности алгоритмов прямой корреляции, подапerture и кодовых скользящих сумм; расчет числа операций для различных длин последовательностей N.

- Аппаратная оценка: обсуждение применения MCU, DSP и FPGA для реализации предложенного метода с точки зрения вычислительных возможностей и задержки.

Научная новизна статьи состоит в следующем:

- Предложен адаптированный метод цифровой согласованной фильтрации, оптимизированный для конечных IoT-устройств с ограниченными ресурсами;

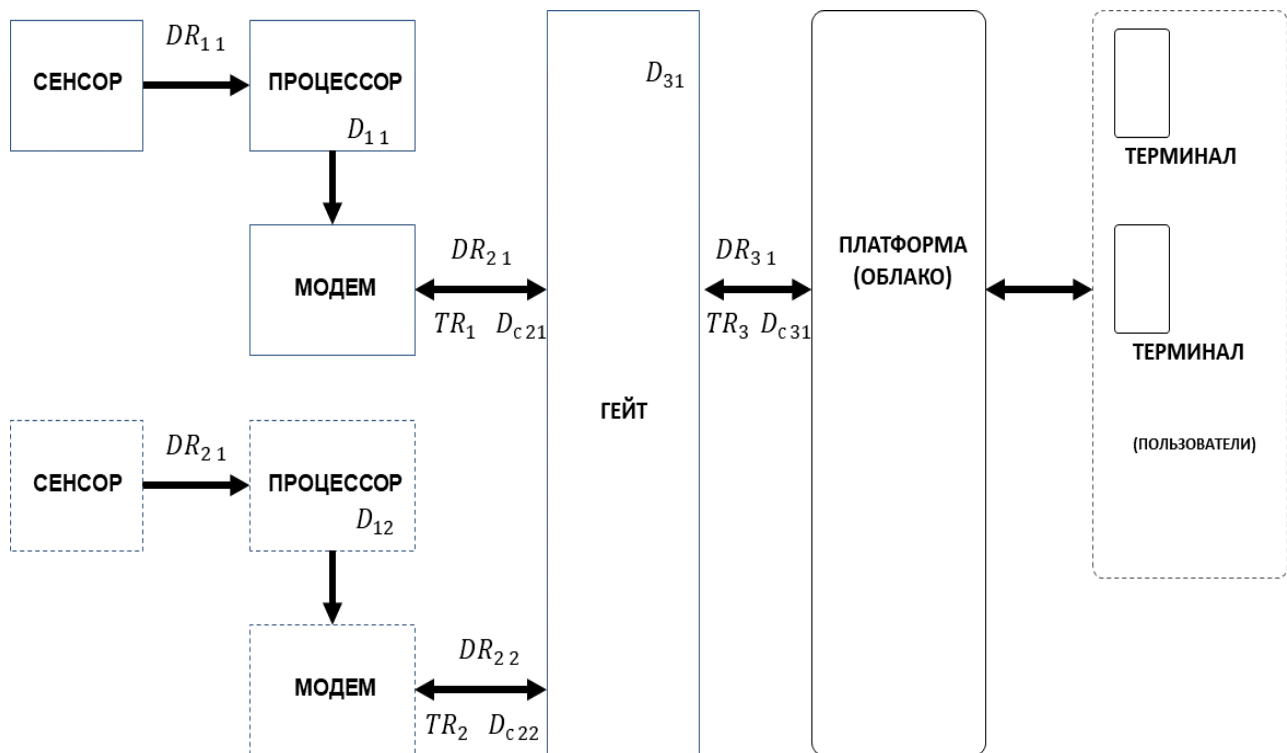
- Разработан алгоритм нормализации и упрощения вычислительных операций (исключение операции квадратного корня и замена деления на усечение младших разрядов), позволяющий снижать задержку обработки;

- Проведена комплексная оценка эффективности детектирования сигналов различной формы с учетом ограничений частоты дискретизации и разрядности АЦП;

- Обоснована практическая применимость метода для промышленного мониторинга, умных автомобилей и умных городов с высокоскоростным потоком данных.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим модель системы Интернета вещей с точки зрения базовых устройств, осуществляющих передачу, прием и обработку данных, а также ключевых характеристик. Предполагается, что вся обработка данных осуществляется в цифровом, а не аналоговом виде, то есть даже при передаче данных от сенсоров к процессору мы оперируем отсчетами определенной разрядности.



DR – скорость потока данных,

TR – пропускная способность канала связи,

D – задержка связанная с обработкой данных

Рис. 1. Модель IoT-системы, с учетом устройств обработки

Сенсор, процессор и модем образуют конечное устройство (модуль). Определим ключевые параметры, связанные с передачей данных (Anufrienko, 2022: 3–8).

DR	Скорость потока данных, бит/с (байт/с)
TR	Пропускная способность канала связи, бит/с (байт/с)
D	Задержка. Данный параметр может выражаться как в количестве тактов, либо в секундах (мкс).

Для первого модуля:

DR_{11} — это скорость потока данных от сенсора к процессору.

D_{11} — задержка, связанная с обработкой процессором потока данных.

DR_{21} — это скорость потока данных между модемом и гейтом,

TR_1 — соответствующая пропускная способность канала связи между модемом и гейтом. Аналогичные параметры (DR_{31} ; TR_3 ; D_3) применяются к каналу «гейт - облако».

В общем случае:

$TR_1 \leq TR_3$;

$TR_1 \geq M * DR_{21}$, где $M < 1$.

Данная модель позволяет оперировать задержками для всех методов обработки сигналов и доставки информации от сенсоров в облако. Далее рассмотрим подходы к корреляционной обработке сигналов, чтобы далее проанализировать подход цифровой обработки на конечном устройстве Интернета вещей, работающем в составе IoT-системы.

Перейдем к анализу существующих подходов к корреляционной обработке сигналов, чтобы в дальнейшем рассмотреть комплексный подход обработки на конечном устройстве в составе IoT-системы.

В радиотехнике корреляция активно используется в радиолокации и гидроакустике для детектирования и идентификации сигналов в шуме. Для увеличения разрешающей способности по дальности при сохранении импульсной мощности широко применяются сигналы относительно большой длительности с внутриимпульсной модуляцией (Рабинер, 1978: 234–399). В радиолокации в качестве широкополосных сигналов в основном используют линейно-частотно модулированные (ЛЧМ) сигналы и сигналы с фазовокодовой манипуляцией (ФКМ) на основе кодов Баркера n -й длины. В настоящее время для согласованной фильтрации в частотной области широко используют алгоритм быстрого преобразования Фурье (Блейхут, 1989: 186–287), очевидным недостатком которого является существенная конвейерная задержка выдачи результата обработки, связанная с необходимостью вычисления быстрого преобразования Фурье (БПФ) и обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ).

Для корреляционной обработки используется согласованный фильтр (СФ), который максимизирует отношение сигнал/шум (S/N) на выходе. Выбор в качестве критерия оптимальности максимального отношения сигнал/шум на выходе фильтра определяет импульсную характеристику этого фильтра. Импульсная характеристика фильтра, обеспечивающего на выходе в момент времени t_0 максимум отношения S/N является зеркальным отражением сигнала, сдвинутым на t_0 (Ламанов, 2015:57–98). Сигнал на выходе СФ определяется выражением:

$$y(t) = \int_0^T S(t)h(t - \tau)d\tau, \quad (1)$$

где $S(t) = S_1(t) + q(t)$, τ – задержка, а $q(t)$ – шумовой компонент.

Импульсная характеристика согласованного фильтра выражается как:

$$h(t) \propto S_i(T - t) \quad (2)$$

где c – константа, $S_i(t)$ – входной сигнал, определенный следующим образом:

$$S_i(t) = \begin{cases} S_i(t), & 0 \leq t \leq T; \\ 0, & T < t < 0. \end{cases} \quad (3)$$

, а T – момент времени дискретизации.

При нулевой задержке имеем автокорреляционную функцию сигнала с его локальной копией:

$$y(t) = \int_0^T S_1^2(t) dt = r_{11}(0) \quad (4)$$

В работе (Ламанов, 2015:57–98) показано, что условную вероятность правильного обнаружения (вероятность превышения порога $y_0 = k_0 z_0$ при наличии сигнала) для СФ можно определить как:

$$W_{п.о.} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(v_0)] = \frac{1}{2} [1 - \Phi(u_0 - qs_0)], \quad (5)$$

где $\Phi(v) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^v \exp(-\frac{v^2}{2}) dv$ – интеграл вероятности, у которого $\Phi(\infty) = 1$, а $\Phi(v) = -\Phi(-v)$, u_0 – относительный порог срабатывания, а qs_0 – отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра. Аналогично, выражение для расчета вероятности ложной тревоги:

$$W_{л.т.} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(u_0)], \quad (6)$$

Функции распределения плотности вероятностей показаны на Рисунке 2, где обозначен пороговый уровень y_0 .

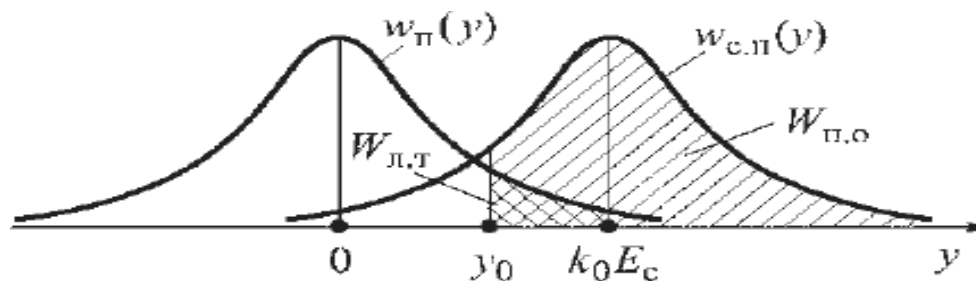
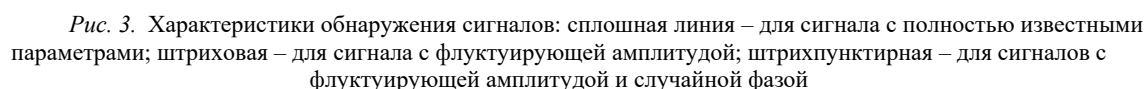


Рис. 2. Плотности распределения вероятностей

Чем выше пороговый уровень, тем меньше вероятность ложной тревоги $W_{л.т.}$, при этом одновременно снижается и вероятность правильного обнаружения $W_{п.о.}$.



Цифровой согласованный фильтр математически описывается следующей формулой:

где N - длина импульсной характеристики согласованного фильтра. Достоинством метода является получение результатов фильтрации с задержкой равной длине N . Вычислительная сложность пропорциональна N^2 .

Возможно ускорение вычисления корреляции путем использования теоремы о корреляции и вычисления БПФ и ОБПФ. Реализация будет быстрее, чем прямое вычисление корреляции, если число отсчетов превышает 128 (Ifeachor, 2001: 184–245). Тогда система реализует вычисление $r_{12}(j)$, которое выражается как:

На выходе системы имеем:

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} q_1(n) A q_2(n + \Delta n + j) \quad (9)$$

где Δn - временная задержка, A – коэффициент затухания (по умолчанию $A=1$). Так как сигналы $q_1(n)$ и $q_2(n)$ случайные, то максимальный выигрыш будет достигнут когда сигналы идут в фазе, что происходит при $j = -\Delta n$

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} q_1^2(n) \quad (10)$$

что эквивалентно средней мощности. Блок-схема реализующая вычисление представлена на Рисунке 4.

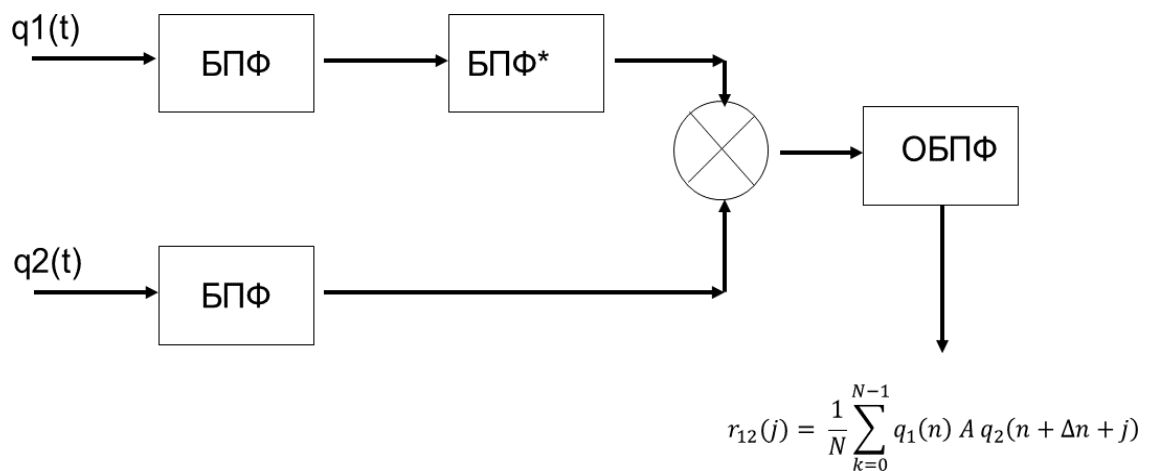


Рис. 4. Блок-схема вычисления корреляции с использованием БПФ

Как видно из рисунка, необходимо для каждого сигнала производить операцию БПФ, далее свертки и обратного преобразования Фурье. Недостатком данной схемы при вычислении БПФ и ОБПФ является существенная конвейерная задержка выдачи результата обработки, пропорциональная базе сигнала.

В работе (Янаков, 2010: 478–481) предлагаются способы согласованной фильтрации методом подапертур и методом кодовых скользящих сумм. Метод кодовых скользящих сумм предназначен для фазово-кодированных (ФКМ)-сигналов, а метод подапертур для линейно-частотно модулированных (ЛЧМ). Количество операций для СФ методом кодовых скользящих сумм составляет $4\sqrt{N}$, а для метода подапертур - $\sqrt{N}$, соответственно.

Реализация метода подапертур требует двойной линии задержки, в противном случае N выбирается так чтобы число подапертур изменилось на угол кратный π (Янаков, 2010: 478–481), что требует специальной подготовки и группирования потока входных данных, а также рекурсивных операций. Результатом является задержка выдачи итогового значения. Результаты, приводимые в данной работе справедливы для применения реализации алгоритмов на базе специализированных микропроцессоров, но не для иных аппаратных архитектур.

IoT — устройства являются относительно маломощными с точки зрения вычислительных возможностей и энергетики, по сравнению с радиолокационными

станциями. Что, из соображений эффективности не позволяет реализовывать сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов, требующие большого количества вычислительных операций, в частности БПФ, ОБПФ для последовательностей 64, 128, 256, 512, 1024 и более символов.

Сравнительный анализ количества операций на основе расчета, для метода кодовых скользящих (МКС), метода подапертур (МПА), прямого метода с обычным делением (*МПр) и прямого метода с делением усечением (МПр), в зависимости от длины N представлена в Таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение оценочного количества вычислительных операций для различных методов, в зависимости от длины N

N	0	2	4	8	16	32	64	128	256	512
МКС	0	6	8	12	16	23	32	46	64	91
МПА	0	3	3	4	4	5	6	7	8	10
*МПр	0	4	16	64	256	1024	4096	16384	65536	262144
МПр	0	4	8	16	32	64	128	256	512	1024

При этом кажущаяся вычислительная сложность прямого метода обработки, по сравнению с другими, исходя из количества операций, обманчива. Для прямого метода, при N пропорциональном 2^n , количество операций соответствует не N^2 , а $2N$, за счет замены классической операции деления, отсечением младших разрядов. Для метода кодовых скользящих и метода подапертур оценка количества операций справедлива при $N \geq 64$, в противном случае, ресурсы, затрачиваемые на обеспечение функционирования алгоритма значительно превышают ценность достигаемого эффекта (Ануфриенко, 2021: 40–45).

Вышеперечисленные факты, говорящие о сложности с одной стороны, и преимущества ряда характеристик с другой стороны, подчеркивают необходимость разработки нового метода и алгоритмов для устройств Интернета вещей. В связи с чем рассмотрим корреляционную функцию подробнее.

Выражение для взаимной корреляции $r_{12}(n)$ двух последовательностей данных $x_1(n)$ и $x_2(n)$ содержащих N отсчетов можно записать как:

$$r_{12} = \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) x_2(n) \quad (11)$$

Однако, такое соотношение даст результат, зависящий от числа отсчетов. Соответственно, требуется нормирование относительно числа отсчетов N . Таким образом, нормированное выражение примет вид:

$$r_{12} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) x_2(n) \quad (12)$$

Так как последовательности данных $x_1(n)$ и $x_2(n)$ смещаются друг относительно друга необходимо вводить задержку. Поэтому взаимная корреляционная функция между двумя цифровыми последовательностями, каждая из которых содержит N данных и нормирована на число отсчетов, может быть записана в виде:

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) * x_2(n+j) \quad (13)$$

где корреляция должна быть рассчитана с задержкой пропорциональной базе сигнала. В случае, когда $x_1(n) = x_2(n)$, процесс больше известен как автокорреляционная функция и может быть записан в виде:

$$r_{11}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(n) = E \quad (14)$$

где E – энергия сигнала.

Значения взаимной корреляции, вычисленные в соответствии с приведенными выше уравнениями, зависят от абсолютных значений данных. Значения коэффициента кросс-корреляции обычно находится в фиксированном диапазоне значений $[-1; +1]$, в случае наличия в области диапазона входных данных отрицательных значений. Где “-1” означает отсутствие совпадений, а “+1” — это полное совпадение (100 % корреляция). Если же область значений положительная, то значения коэффициента кросс-корреляции будут находиться диапазоне $[0; +1]$.

Необходимо осуществлять нормализацию значений на величину, зависящую от энергии (амплитуды) сигнала. И нормализованное выражение для r_{12} примет вид:

$$\rho_{12}(j) = \frac{r_{12}(j)}{\frac{1}{N} \sqrt{\left[\sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(n) * \sum_{n=0}^{N-1} x_2^2(n) \right]}} \quad (15)$$

Вычислительная сложность знаменателя выражения (15) относительно высока и требует больших вычислительных ресурсов и задержки. Особенно для операции деления и извлечения квадратного корня.

Количество тактов задержки при операции квадратного корня зависит от разрядности и составляет $\log_2(K) - 1$. То есть для 8-бит, количество тактов задержки составит 7. Данный факт означает, что для синхронного вычисления квадратного корня при наличии потоковой обработки данных, тактовая частота модуля расчета квадратного корня должна быть в 4 раза выше тактовой частоты системы, что требует либо дополнительного тактового входа, либо PLL. Для операции деления, задержка также зависит от разрядности и может составлять от $\log_2(K) / 2$ до $\log_2(K) - 1$.

С учетом того, что для обозначенных выше граничных условий выполняется неравенство:

$$\sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(n) \geq \sum_{n=0}^{N-1} x_2^2(n) \quad (16)$$

Так как знаменатель необходим как коэффициент нормировки, то его величина не должна приводить к возникновению ситуации, когда $\rho_{12} > 1$, обратная же ситуация допустима. Поэтому, в знаменателе выражения (15) $x_2(n)$ можно заменить на $x_1(n)$.

И в итоге знаменатель выражения (15) примет вид:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(n) = \text{const} \quad (17)$$

Таким образом, благодаря сделанным допущениям, можно избежать операции по извлечению квадратного корня. Дополнительное допущение, связанное с приведением итогового значения знаменателя к числу эквивалентному 2^n , позволит заменить операцию классического деления на усечение младших разрядов. Данная операция потребует либо всего лишь одного дополнительного такта, либо может быть выполнена одновременно с другой операцией.

В приложениях для Интернета вещей (Промышленные, Умные автомобили, Умный город, Транспорт), в процессе измерений параметров систем, при тестировании или в режимах эксплуатации используются большое количество групп датчиков на изделиях, генерирующих данные. Как уже упоминалось, не все данные должны передаваться и накапливаться с целью хранения и дальнейшей обработки. Пример промышленного применения показан на Рисунке 5. Представлен авиадвигатель в режиме проведения испытаний с набором сенсоров, передающих данные в соответствующий центр сбора данных.

Для точного анализа соответствия параметров наиболее важна информация о поведении узлов и агрегатов на критических и закритических режимах, особенно в процессе тестирования и испытаний. Именно для таких режимов актуально снятие показаний с максимально короткими интервалами (высокой частотой дискретизации SR). Активно развивающаяся тематика систем предиктивной аналитики позволяет строить прогнозные модели на основе измеренных данных. Соответственно, чем более точные результаты измерений, тем выше точность моделей.

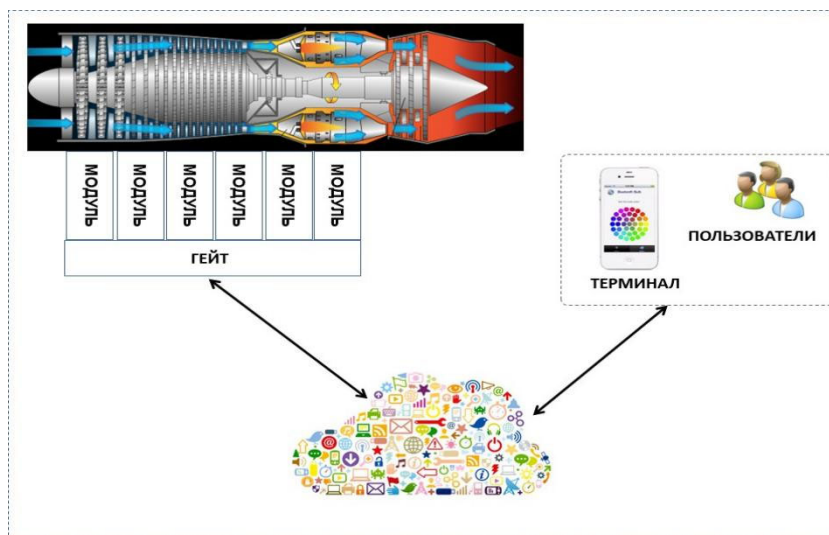


Рис. 5. Типовая тестовая схема с высокоскоростным потоком данных

Следовательно, для предлагаемого метода, необходимо увеличивать частоту дискретизации SR, для исключения пропуска сигналов, представляющих прикладной интерес для анализа.

Пример пропуска и детектирования события в зависимости от частоты дискретизации описан на Рисунках 6. а) и б) (Anufrienko, 2020: 21–31). В цифровой обработке сигналов также наблюдается тренд на повышение частоты дискретизации, причем речь идет как о частоте дискретизации при аналогово-цифровом преобразовании

F_S , так и частоте SR, то есть при работе с отсчетами данных из уже оцифрованной последовательности данных.

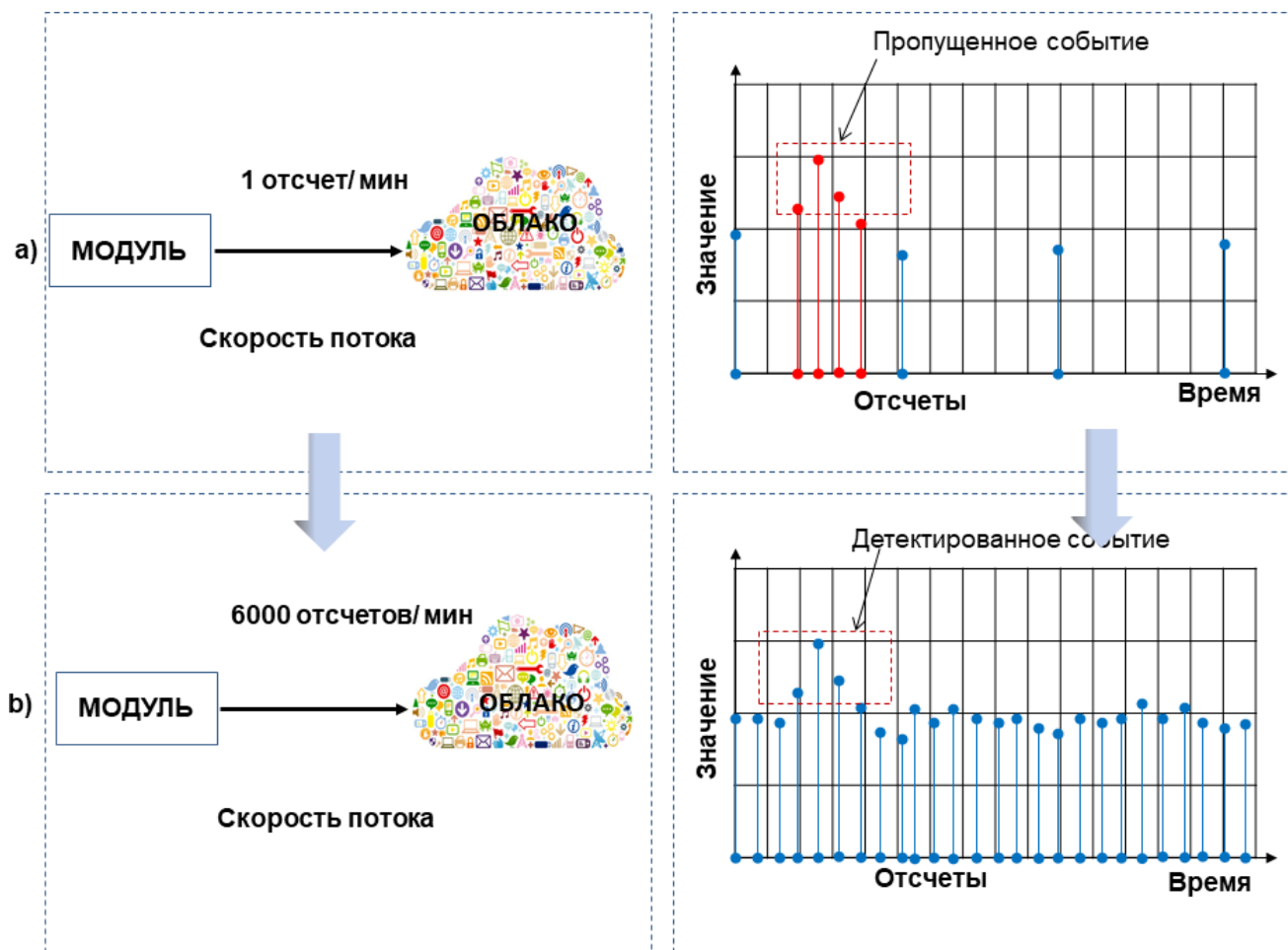


Рис. 6. а) Пропущенное событие при низкой скорости потока и б) Выявленное событие при высокой скорости потока

На практике недостаточно определять, что поступивший от датчика сигнал, например, значение температуры, больше или меньше predetermined (ожидаемого) значения. Важно получить информацию о тренде – восходящий, нисходящий, скорость нарастания или спада. Поэтому, простые пороговые методы (Thresholding) не подходят для решения существующих задач, несмотря на простоту реализации на любых аппаратных платформах.

Для описания сигналов воспользуемся методом кусочно-линейной аппроксимации. Огибающую участка сигнала заменим линиями с определенным наклоном к оси абсцисс. Определим следующие формы сигналов для аппроксимации (Рис. 7):

$S_1[n]$: треугольная 45 градусов – средняя скорость нарастания сигнала;

$S_2[n]$: прямоугольная – высокая скорость нарастания и спада фронта сигнала;

$S_3[n]$: треугольная 30 градусов – медленная скорость нарастания сигнала.

Согласно (Шахтарин, 2015: 233–578), форма сигнала не оказывает влияния на характеристики обнаружения.

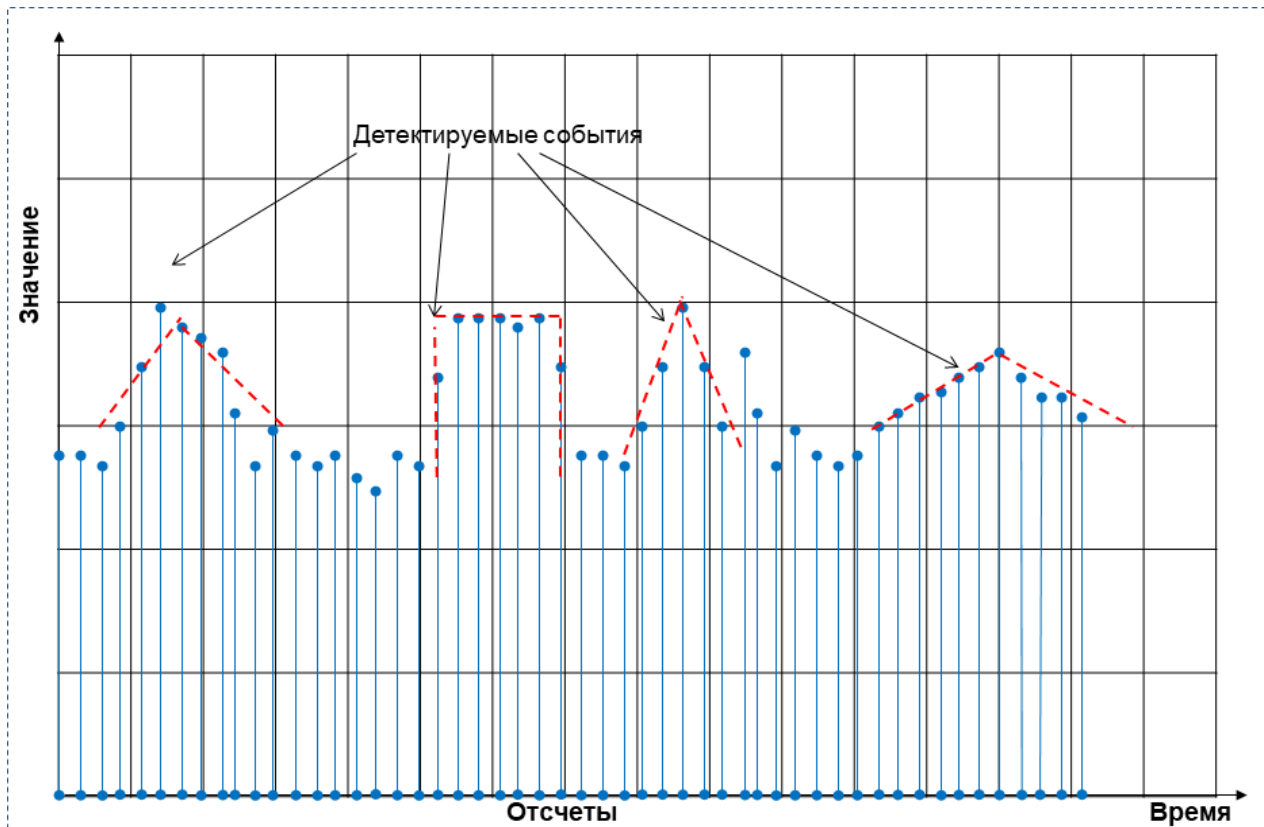


Рис. 7. Пример событий, подлежащих детектированию

С учетом того, что мы оперируем оцифрованным сигналом, в отличие от классического представления аналогового сигнала в аналитическом виде, в случае цифрового представления сигнала достаточно определить количество отсчетов, соответствующих длине N , и их значения. Определим среднее значение сигнала для длины последовательности X_0

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \quad (18)$$

для определения порогового уровня постоянной составляющей. Тогда в установившемся режиме $A_0 = \bar{x}$.

Определим следующие условия:

Таблица 2 – Начальные условия для реализации

1) Диапазон значений отсчетов входного потока данных $[0; K-1]$, где $K = 256; 1024; 16384$, определяется параметрами АЦП.
2) Среднее значение сигнала $A_0 = \bar{x}$, при длине последовательности X_0 ;
3) $[0 < A_0 \leq K-1]$;
4) $[A_0 < S_1[n] \leq K-1]$;
5) $[A_0 < S_2[n] \leq K-1]$;
6) $[A_0 < S_3[n] \leq K-1]$;
7) Частота дискретизации SR , определяется параметрами АЦП.

Схема, которую необходимо в общем случае реализовать на конечном устройстве в соответствии с выражением (15) представлена на Рисунке 8, где $x_1(n)$ – опорный сигнал, а $x_2(n)$ – входная последовательность.

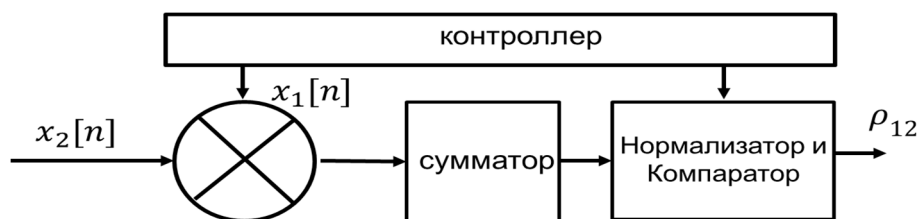


Рис. 8. Блок-схема корреляционной обработки, реализуемой для конечного IoT устройства

Типовая архитектура конечного IoT автономного устройства представлена на Рисунке 9 и включает в себя сенсор (датчик); беспроводной (проводной) модем, включающий в свою очередь, процессор, элемент питания и актуатор реализующий управляющие воздействия.

Как правило, существующие процессоры IoT устройства основаны на архитектуре ARM, 8051 или иной, и предназначены для обеспечения реализации функции коммуникации (BaseBand), управления доступом к среде (MAC) и приложений (Application), то есть выполняют специализированную задачу и имеют тактовую частоту 10–20 МГц. И не подходят с точки зрения применения его как специализированного вычислительного узла.

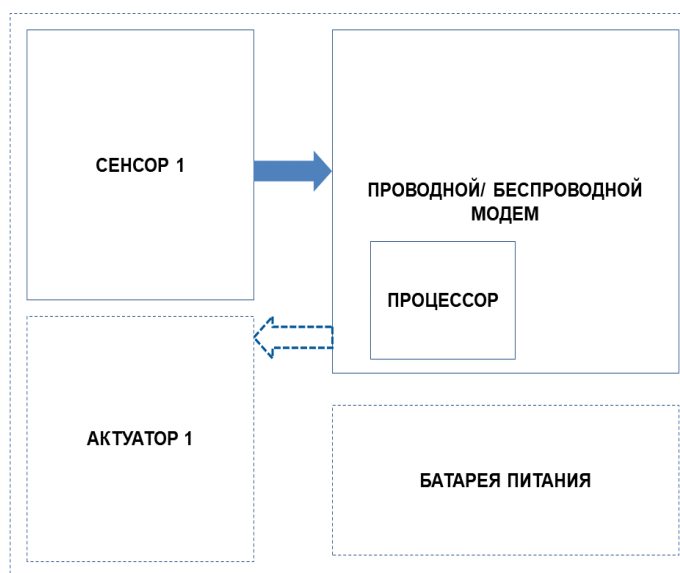


Рис. 9. Типовая блок-схема конечного IoT устройства

Именно поэтому авторы работ, рассмотренных ранее в Главе 1, ориентируются на Граничный и Облачный подходы, где вычисления реализуются на уровне гейтов и выше.

Предлагается следующая архитектура конечного устройства (Рис. 10).

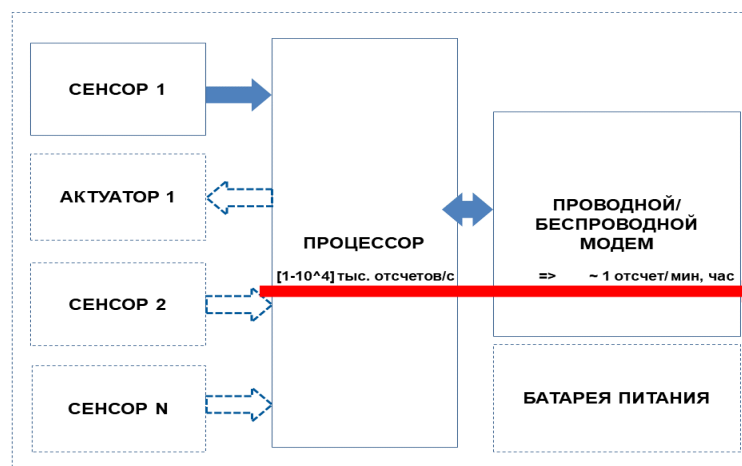


Рис. 10. Предлагаемая блок-схема конечного IoT устройства

Данная архитектура отличается от предыдущей архитектуры (Рис. 9) наличием отдельного процессора, предназначенного для корреляционной обработки. В качестве примера на рисунке показано, что функция процессора — это снижение объема передаваемых конечным устройством данных с десятков тысяч в секунду, до единиц отсчетов в минуту.

Существует несколько типов цифровых устройств, которые могут быть пригодны для задач прототипирования и реализации согласованной фильтрации — это микроконтроллеры (MCU), цифровые сигнальные процессоры (DSP) и программируемые логические интегральные схемы (FPGA). Потенциальное удобство микроконтроллерных устройств заключается в том, что они имеют встроенные датчики и аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), но тактовая частота и разрядность работы как самого микроконтроллера, так и входящих в него элементов ограничены.

Микроконтроллеры и цифровые сигнальные процессоры выполняют операции последовательно, поэтому в случае необходимости обработки большого количества параллельных потоков, потребуется соответствующее параллельное количество обращений к памяти и регистрам, и задержка обработки сигнала от момента поступления на вход устройство до выхода будет значительной. Вплоть до невозможности реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов. Поэтому, DSP и MCU имеют очень ограниченный потенциал применения для предлагаемого метода.

FPGA устройства представляют собой оптимальный вариант для быстрой параллельной обработки в случае согласованного фильтра и инвариантны к скорости потока (частоте дискретизации SR). ASIC (специализированные интегральные микросхемы) особенно перспективны в случае реализации системы на кристалле (SoC), включающей в себя датчик(и) и процессор. При массовом производстве данная связка обеспечит низкую итоговую себестоимость SoC.

Определим количество отсчетов в опорной последовательности $x_1[n] = 8$, соответственно $N = 8$. С учетом ранее определенных условий в Таблице 2, блок-схема алгоритма выглядит следующим образом (Рис. 11).

В качестве среды для моделирования был использован MATLAB. В первую очередь была сгенерирована псевдослучайная последовательность чисел в диапазоне [25...35], размерность массива данных = 1 млн. отсчетов. Разрядность отсчета = 8-бит (int8). Необходимо заметить, что моделирование проводилось для длин последовательности потока данных $x_2[n]$ вплоть до 10 млн. символов. Для наглядности представления результатов, длина последовательности $x_2[n]$ уменьшена до 200 отсчетов.

В сгенерированную последовательность были добавлены всплески - треугольная $S_1[n]$, прямоугольная $S_2[n]$ и $S_3[n]$, длиной 8 отсчетов, а также ряд аналогичных событий

(всплесков) в районе 130, 165 и 185 отсчетов треугольной формы различной крутизны и амплитуды. С практической точки зрения, количество отсчетов в аномальных всплесках зависит от частоты дискретизации SR. Таким образом, были определены две опорные последовательности $x_1[n]$ для сигналов треугольной формы и прямоугольной.



Рис. 11. Алгоритм корреляционной обработки

Результаты моделирования в соответствии с вышеописанным алгоритмом демонстрируются на Рисунке 12. Для наглядности приводятся значения корреляции ρ_{12} до компаратора, то есть до реализации отсечки на основе порогового значения TH.

Передача финального значения ρ_{12} в модем, при превышении уровня TH, должна производиться вместе с соответствующим элементом последовательности $x_2[n]$.

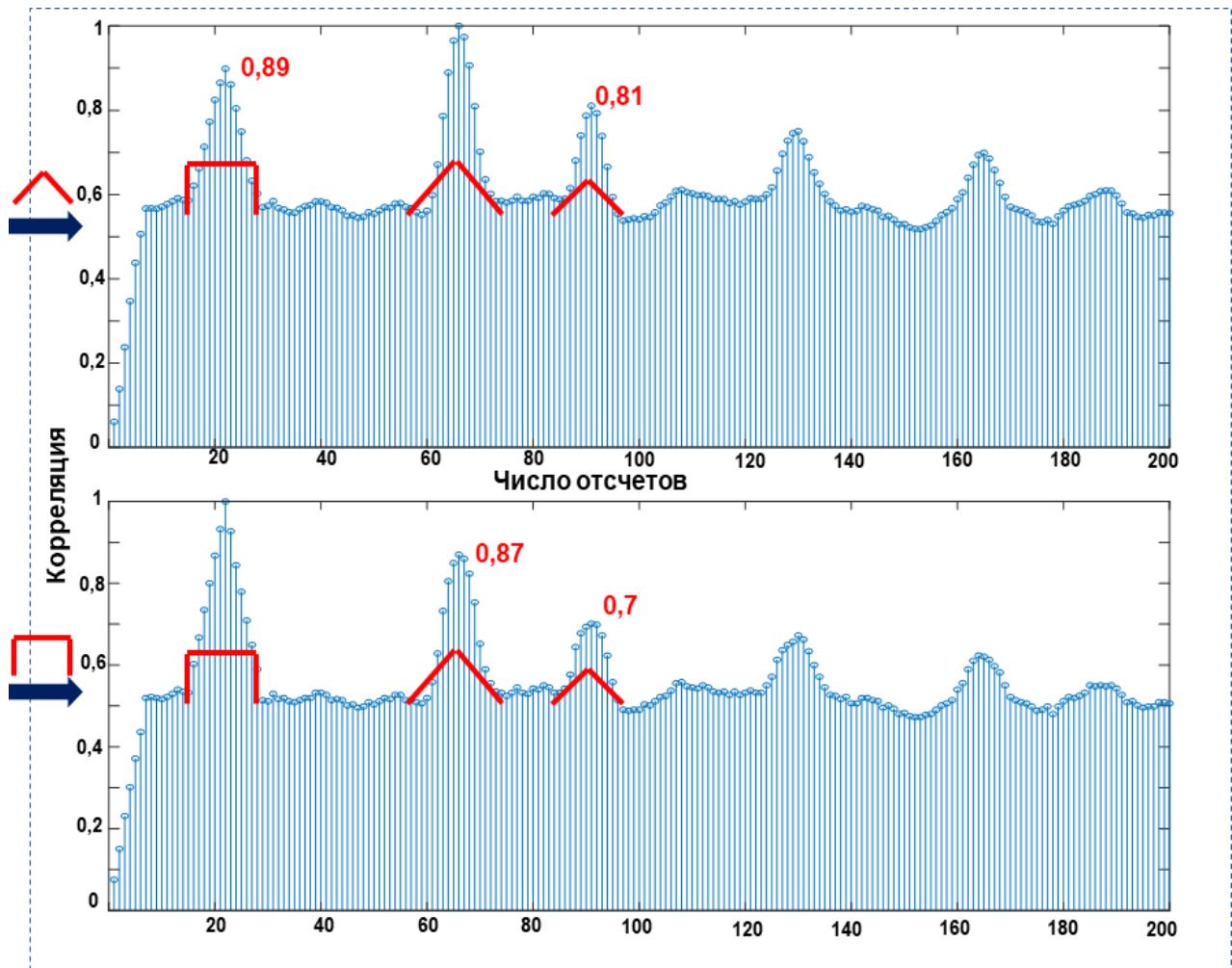


Рис. 12. Значения корреляции для различных типов сигналов. а) сверху – для опорного сигнала треугольной формы б) снизу - для опорного сигнала прямоугольной формы.

Как видно из Рисунка 12, при опорной последовательности $x_1[n]$ треугольной формы максимальное значение корреляции при наличии в потоке данных события прямоугольной формы $S_2[n]$ $\rho_{12} = 0.89$, при наличии события треугольной формы типа $S_1[n]$ максимальное значение корреляции $\rho_{12} = 1$, а для треугольной формы типа $S_3[n]$ $\rho_{12} = 0.81$.

В случае опорного сигнала $x_1[n]$ прямоугольной формы и аналогичной последовательности потока данных (Рис. 13), ситуация меняется и уже для события прямоугольной формы $S_2[n]$ значение корреляции $\rho_{12} = 1$, а для остальных событий – 0,87 и 0,7 соответственно.

Кроме того, на Рисунках 12-13 присутствуют всплески в области 130, 165 и 185 отсчетов. Но для опорной последовательности прямоугольной формы максимальные значения корреляции меньше чем для опорной последовательности треугольной формы.

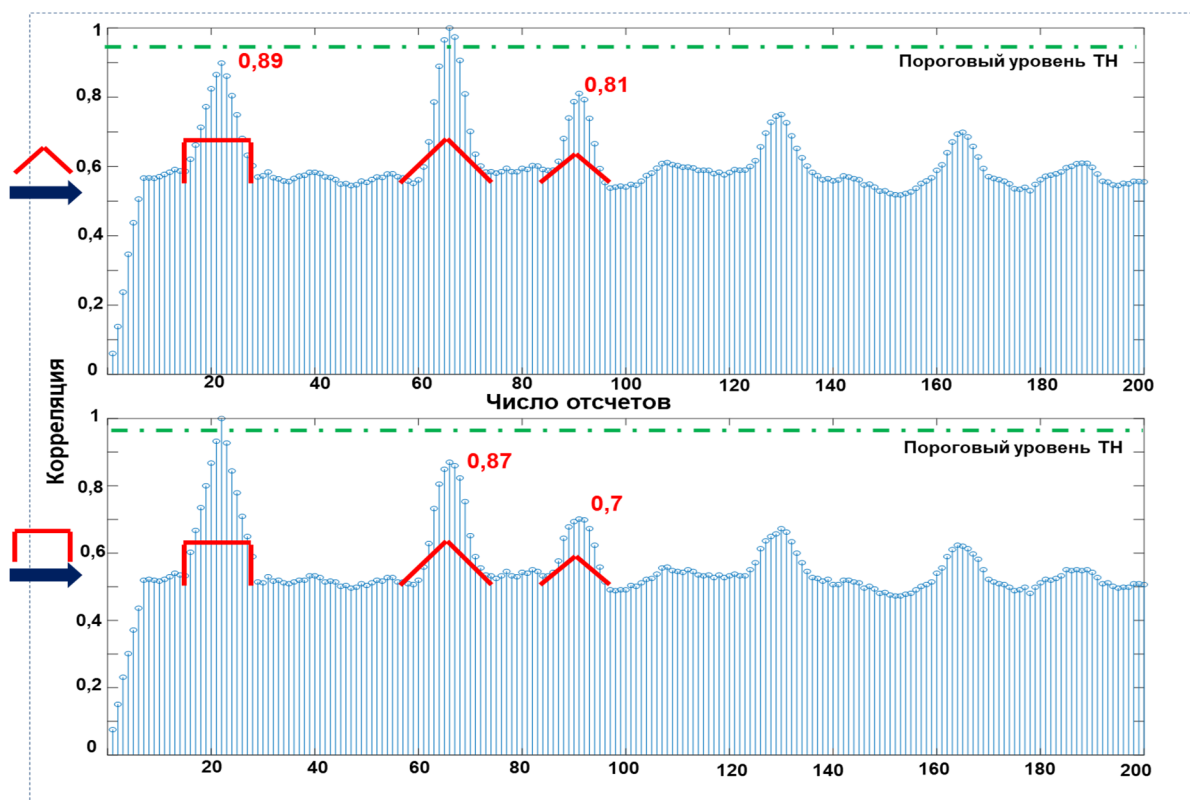


Рис. 13. Пороговый уровень ТН для значений корреляции для различных типов сигналов. а) сверху – для опорного сигнала треугольной формы б) снизу – для опорного сигнала прямоугольной формы.

Как упоминалось ранее, с точки зрения получения максимального отношения сигнал/шум, согласованный фильтр – это оптимальное устройство обработки сигналов (Ламанов, 2015:57–98).

Таким образом, можно утверждать, что по критерию максимального отношения сигнал/шум использование адаптированного для IoT устройств, метода согласованной фильтрации позволяет решать задачу детектирования сигналов (событий) различной формы при реализации на дискретных конечных устройствах, что продемонстрировано результатами моделирования.

Для эффективной работы алгоритма необходимо определить пороговое значение ТН. Для приведенных условий, при уровне ТН = 0.9 достигается эффективное разделение.

Итоговое значения знаменателя приводится к числу эквивалентному степени 2, операцию деления выполняется за счет усечения младших разрядов. Как упоминалось ранее данная операция потребует либо всего лишь одного дополнительного такта, либо может быть выполнена одновременно с другой операцией.

Заключение

В рамках проведенного исследования были реализованы поставленные цели и методы, направленные на изучение эффективности цифровой корреляционной обработки сигналов на конечных устройствах Интернета вещей (IoT). Основной задачей являлось создание адаптированного метода согласованной фильтрации, способного эффективно работать при ограниченных вычислительных ресурсах и обеспечивать надежное детектирование сигналов различной формы.

В ходе исследования выполнены следующие этапы: проведен анализ существующих методов цифровой обработки сигналов; разработан алгоритм адаптированной цифровой корреляционной фильтрации с нормализацией и упрощенными вычислительными операциями; смоделированы цифровые последовательности данных, имитирующие работу

сенсоров; реализован алгоритм на платформе MATLAB и оценена его эффективность с точки зрения точности детектирования и вычислительной сложности.

Полученные результаты подтвердили истинность выдвинутой гипотезы: предложенный метод позволяет с высокой точностью выявлять сигналы различной формы, снижая количество вычислительных операций и минимизируя задержку обработки. Сравнительный анализ показал преимущество предложенного подхода по сравнению с методами прямой корреляции, подапертур и кодовых скользящих сумм, особенно для устройств с ограниченной вычислительной мощностью.

Выводы исследования можно обобщить следующим образом:

- Адаптированный метод цифровой корреляционной фильтрации обеспечивает надежное детектирование сигналов даже при ограниченных ресурсах конечных IoT-устройств.

- Использование нормализации и упрощенных вычислительных операций снижает вычислительную нагрузку без снижения точности обработки.

- Метод применим для анализа сигналов различной формы, включая треугольные, прямоугольные и шумовые сигналы, что расширяет его практическую применимость.

Перспективы дальнейшей работы включают:

- реализацию алгоритма на аппаратных платформах MCU, DSP и FPGA для промышленного тестирования;

- адаптацию метода для работы в реальном времени с потоками больших данных в системах умного города, промышленного мониторинга и умных транспортных систем;

- интеграцию с другими методами обработки данных для улучшения энергоэффективности и снижения объема передаваемой информации.

Таким образом, проведенное исследование расширяет научное знание в области цифровой обработки сигналов и IoT, демонстрируя возможности эффективной реализации алгоритмов корреляционной фильтрации на конечных устройствах с ограниченными ресурсами. Полученные результаты имеют практическую ценность для разработки интеллектуальных сенсорных систем, способных работать в условиях реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

Anufrienko, 2022 — Anufrienko A. Fast Data Processing by IoT Devices // In: Koucheryavy Y., Balandin S., Andreev S. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN ruSMART 2021. Lecture Notes in Computer Science. — Springer, Cham. — Vol. 13158. — 2022. — Pp. 3–8. [Eng.]

Ануфриенко, 2021 — Ануфриенко А.Ю. Оценка сложности реализации обработки данных на конечных IoT-устройствах // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2021. — № 10. — С. 40–45. [Russ.]

Anufrienko, 2020 — Anufrienko A. Methods for Reducing the Amount of Data Transmitted and Stored in IoT Systems // In: Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, 20th International Conference, NEW2AN 2020, and 13th Conference, ruSMART 2020, St. Petersburg, Russia, Proceedings, — Springer. — August 26–28, 2020. — Part I. — Issue 12525. — P. 21–31. [Eng.]

Рабинер, 1978 — Рабинер Л., Голд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Под ред. Ю.Н. Александрова. — М.: Мир. — 1978. — 848 с. [Russ.]

Блейхут, 1989 — Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. — М.: Мир. — 1989. — 448 с. [Russ.]

Ламанов, 2015 — Ламанов А.И., Нефедов С.И., Слукин Г.П. Введение в теорию радиолокации: учебное пособие. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2015. — 150 с. [Russ.]

Шахтарин, 2015 — Шахтарин Б.И. Обнаружение сигналов: учеб. пособие для вузов. — 3-е изд., испр. — М.: Горячая линия – Телеком. — 2015. — 465 с. [Russ.]

Федоров, 2011 — Информационные технологии в радиотехнических системах: учебное пособие / Под ред. И.Б. Федорова. — 3-е изд. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2011. — 848 с. [Russ.]

Сизых, 2017 — Случайные процессы. Примеры и задачи. Том 4 – Оптимальное обнаружение сигналов: учебное пособие для вузов / Под ред. В.В. Сизых, В.И. Тихонова, Б.И. Шахтарина. — 2-е изд., испр. — М.: — 2017. — 400 с. [Russ.]

Ifeachor, 2001 — Ifeachor E., Jervis B. Digital Signal Processing: A Practical Approach. — 2nd ed. — Hardcover. — USA: Prentice Hall. — 2001. — Pp. 184–245. [Eng.]

Янаков, 2010 — Янаков Е.С. Методы согласованной фильтрации широкополосных сигналов с минимальными временными задержками // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). — 2010. — № 1. — С. 478–481. [Russ.]

REFERENCES

- Anufrienko, 2022 — Anufrienko, A.Yu. (2022). Fast Data Processing by IoT Devices // In: Koucheryavy, Y., Balandin, S., Andreev, S. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN ruSMART 2021. Lecture Notes in Computer Science. — Springer, Cham. — 2022. — Vol. 13158. — Pp. 3–8. [in Eng.]
- Anufrienko, 2021 — Anufrienko, A.Yu. (2021). Otsenka slozhnosti realizatsii obrabotki dannykh na konechnykh IoT-ustroystvakh [Assessment of Complexity of Data Processing on End IoT Devices] // Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii. — 2021. — № 10. — Pp. 40–45. [in Russ.]
- Anufrienko, 2020 — Anufrienko, A. (2020). Methods for Reducing the Amount of Data Transmitted and Stored in IoT Systems // In: Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, 20th International Conference, NEW2AN 2020, and 13th Conference, ruSMART 2020, St. Petersburg, Russia, Proceedings, Part I, Issue 12525. — Springer. — August 26–28, 2020. — Pp. 21–31. [in Eng.]
- Rabiner, 1978 — Rabiner, L., Gold, B. (1978). Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov / Pod red. Yu.N. Aleksandrova [Theory and Application of Digital Signal Processing / Ed. Yu.N. Aleksandrov]. — M.: Mir. — 1978. — 848 p. [in Russ.]
- Bleichut, 1989 — Bleichut, R. (1989). Bystrye algoritmy tsifrovoy obrabotki signalov [Fast Algorithms for Digital Signal Processing]. — M.: Mir. — 1989. — 448 p. [in Russ.]
- Lamanov, 2015 — Lamanov, A.I., Nefedov, S.I., Slukin, G.P. (2015). Vvedeniye v teoriyu radiolokatsii: uchebnoye posobie [Introduction to Radar Theory: Textbook]. — M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana. — 2015. — 150 p. [in Russ.]
- Shakhtarin, 2015 — Shakhtarin, B.I. (2015). Obnaruzheniye signalov: ucheb. posobie dlya vuzov [Signal Detection: Textbook for Universities]. — 3rd ed., corrected. — M.: Goryachaya liniya – Telekom. — 2015. — 465 p. [in Russ.]
- Fedorov, 2011 — Fedorov, I.B. (ed.) (2011). Informatsionnyye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh: uchebnoye posobie [Information Technologies in Radio-Technical Systems: Textbook]. — 3rd ed. — M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana. — 2011. — 848 p. [in Russ.]
- Sizykh, 2017 — Sizykh, V.V., Tikhonov, V.I., Shakhtarin, B.I. (2017). Sluchaynye protsessy. Primery i zadachi. Tom 4 – Optimal'noye obnaruzheniye signalov: uchebnoye posobie dlya vuzov [Random Processes. Examples and Problems. Vol. 4 – Optimal Signal Detection: Textbook for Universities]. — 2nd ed., corrected. — M.: — 2017. — 400 p. [in Russ.]
- Ifeachor, 2001 — Ifeachor, E., Jervis, B. (2001). Digital Signal Processing: A Practical Approach. — 2nd ed., Hardcover. — USA: Prentice Hall. — 2001. — Pp. 184–245. [in Eng.]
- Yanakov, 2010 — Yanakov, E.S. (2010). Metody soglasovannoy filtratsii shirokopolosnykh signalov s minimal'nymi vremennymi zaderzhkami [Methods of Matched Filtering of Wideband Signals with Minimal Time Delays] // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES). — 2010. — № 1. — Pp. 478–481. [in Russ.]