

УДК 53.083.92

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-38-49

Исследование алгоритма непрерывной дискретной свертки на цифровом сигнальном процессоре

С. А. Трефилов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Ю. Р. Никитин, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Д. А. Пономарев, АО «Ижевский радиозавод», Ижевск, Россия

Непрерывная дискретная свертка является важным инструментом в современных системах навигации роботов благодаря своей способности эффективно обрабатывать сигналы. Современными системами навигации роботов используются различные методы фильтрации и интеграции данных, такие как фильтр Калмана или алгоритм одновременной локализации и картографирования (SLAM). Однако непрерывная дискретная свертка дополняет эти подходы. Разработан алгоритм непрерывной дискретной свертки на базе быстрого преобразования Фурье (БПФ), что позволяет обрабатывать большие объемы данных в реальном времени, что критично для навигации роботов. Так как сигналы с лавинного фотодиода непрерывно преобразуются с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и записываются в буфер, то они представляют собой временные ряды. Непрерывная дискретная свертка, учитывающая временную последовательность данных, хорошо подходит для анализа таких данных и извлечения из них полезной информации. Проведены исследования алгоритма непрерывной дискретной свертки на процессоре TMS320F28377D, реализованном на базе БПФ временных интервалов лазерных дальнометров и веерных маяковых лазерных систем. Особенностью реализации дискретной свертки является его работа в режиме реального времени для поиска сигналов лазеров маяков с заданной частотой. В программе реализовано одновременное преобразование аналогового сигнала оптического приемника при помощи встроенного АЦП, запись цифрового сигнала в один из двух буферов и параллельные вычисления в другом буфере быстрой свертки на процессоре и сопроцессоре TMS320F28377D на ассемблере. Для повышения скорости обработки данных использованы два модуля прямого доступа к памяти DMA, модуль ускорителя CLA процессора TMS320F28377D. Получена корреляционная функция, вычисленная в результате свертки исходного сигнала с эталонным сигналом прямоугольной формы с заданной частотой. Максимум вычисленной корреляционной функции показывает задержку времени между началом передачи импульсов маяка и временем приема на фотодиоде. Данное время задержки показывает азимут на маяк.

Ключевые слова: дискретная свертка сигнала, быстрое преобразование Фурье, корреляционная функция, цифровой сигнальный процессор, лазер, маяк.

Введение

В задачах навигации мобильных роботов важнейшей является выполнение свертки двух сигналов, которую можно использовать для определения азимута на лазерный маяк. Дискретная свертка сигналов – умножение двух спектральных плотностей сигналов: один сигнал эталонный, по которому будет вестись поиск, второй – рабочий, в нем ведется поиск эталонного сигнала. Дискретная свертка помогает найти сходство двух сигналов и определить нахождение эталонного сигнала по времени в рабочем сигнале, поэтому дискретная свертка является очень важной в задачах анализа сигналов для навигации мобильных роботов.

Для получения спектра сигнала используется преобразование Фурье. Для выполнения свертки нужно выполнять два преобразования Фурье – по одному для каждого из сигналов, после чего

произвести умножение получившихся спектров. Затем после умножения спектров нужно выполнять обратное преобразование Фурье для перехода от спектральной к временной области.

В задачах обработки сигналов иногда требуется выполнять обработку получаемого сигнала непрерывно. Если выполнять все последовательно – сначала считывать данные сигнала, после чего выполнять свертку и затем зациклить этот алгоритм – то во время выполнения свертки будут пропущены данные от сигнала с датчика. Чтобы выполнять свертку непрерывно, необходимо выполнять преобразование Фурье в течение времени, меньшего по сравнению со временем записи сигнала в буфер.

Цель – разработка алгоритма непрерывной дискретной свертки для навигации мобильных роботов, время выполнения которого должно быть меньше, чем время считывания сигнала с времяпролетного диода, преобразования его

цифровую форму и запись данных в массив из 4096 16-разрядных ячеек.

В этом случае исключается потеря информации от лазерных маяков. Особенностью алгоритма является его распараллеливание: одновременно выполняется преобразование сигнала в цифровую форму, запись данных в массив и алгоритм непрерывной дискретной свертки для определения координат мобильного робота.

Обзор научной литературы по алгоритмам непрерывной дискретной свертки

В статье [1] рассматриваются различные методы быстрого вычисления корреляции и свертки: БПФ-свертка, методы перекрытия с накоплением и перекрытия с суммированием. В статьях [2, 3] предлагаются методы высокоскоростной свертки, которые позволяют сократить число операций.

В работе [4] рассматривается быстрое действие различных алгоритмов вычисления свертки. В статье [5] рассматривается обработка сложных сигналов в радиолокации путем анализа их спектрограмм.

В статье [6] приводится обзор различных навигационных технологий, рассматривается навигация на основе измерительных приборов для мобильных роботов в различных условиях. Кроме того, проводится сравнение технологий, методологий, приложений, алгоритмов уменьшения ошибок и различных видов систем восприятия, а также таких показателей, как точность и удобство использования.

В работе [7] представлена полная гибридная навигационная система для мобильных роботов. Работа позволяет реализовать автономное позиционирование на больших расстояниях и планирование пути для мобильных роботов в неструктурированных сценариях. Автономное позиционирование достигается за счет использования подходящих методов для удовлетворения различных требований к применению и точности для различных расстояний. На основе кривой Безье предложена схема планирования траектории и разработан контроллер движения, который позволяет мобильному роботу следовать до целевой точки. Для обработки сигналов с датчиков и формирования управляющих сигналов контроллера движения используется фильтр Калмана. Результаты исследования подтверждают эффективность гибридной навигации, которая может быть использована в автономной складской логистике и мобильной робототехнике.

Работа [8] посвящена исследованию интеллектуальных навигационных технологий, способных обеспечить автономную навигацию мобильного робота в неизвестной среде в режиме реального времени на основе мягких вычислений. В качестве методов мягких вычислений использовались искусственные нейронные сети и нечеткая логика.

В статье [9] представлена RoboNav – экономичная и точная навигационная система дециметрового класса, которая может быть использована для развертывания в области автономных сельскохозяйственных роботов. Новизна системы заключается в использовании двойной GPS-конфигурации на основе двух модулей u-blox, которые работают в сочетании с тремя недорогими инерциальными датчиками в рамках фильтра Гаусса, способного объединить несколько расширенных фильтров Калмана для решения проблем смещения IMU и потери сигнала GPS. Система обеспечивает оценку положения и курса с высокой точностью и надежностью, при этом ее стоимость значительно ниже, чем у существующих эквивалентных навигационных систем. Система RoboNav была проверена на коммерческом винограднике путем проведения экспериментальных испытаний с использованием вездеходного гусеничного робота, которому было приказано следовать по серии GPS-точек, стараясь минимизировать ошибку кросстрекинга, и показала средние ошибки порядка 0,2 м и 0,2° для измерения положения и угла рысканья соответственно.

В работе [10] проведен анализ литературы по навигационным стратегиям, используемым мобильным роботом (MP). Выбраны будущие направления исследований и возможные проблемы, связанные с оптимизацией навигационной системы MP.

Работа [11] посвящена обзору различных алгоритмов автономной навигации MP, из которых были выделены наиболее подходящие для случаев, когда робот должен ориентироваться в динамических средах. На основе выявленных алгоритмов было проведено сравнение этих традиционных алгоритмов и алгоритмов на основе DRL с использованием роботизированной платформы для оценки их производительности, выявления их преимуществ и недостатков и предоставления рекомендаций по их использованию в соответствии с требованиями к разработке робота. Были выбраны следующие алгоритмы: DWA, TEB, CADRL и SAC.

В статье [12] исследуется система навигации мобильных роботов. Планирование пути сочетает в себе алгоритм планирования глобального пути и алгоритм планирования локального пути. Для повышения точности навигационной системы в навигационную систему добавлен алгоритм позиционирования.

В работе [13] предлагается навигационная система для мобильного робота. Отдельный малогабаритный компьютер RaspberryPi обеспечивает восприятие окружающей среды, обрабатывая информацию, полученную с помощью модуля Lidar и веб-камеры, а также локализацию и планирование с помощью операционной системы Robot Operating System (ROS). Связь между двумя компьютерами позволяет создать полноценную систему навигации робота.

Вопросы цифровой обработки сигналов, включая построение эффективных алгоритмов цифровой фильтрации и синтез банков фильтров, рассматриваются в многочисленных трудах. В статье [14] предложен способ выполнения цифровой фильтрации в системе остаточных классов с использованием модифицированных умножителей с накоплением. Проведен анализ цифровых фильтров, использующих арифметику системы остаточных классов, и представлены результаты аппаратного моделирования на FPGA. Показано, что использование системы остаточных классов позволяет увеличить частоту цифровых фильтров примерно в 4 раза, а аппаратные затраты уменьшить в 3 раза по сравнению с использованием традиционной позиционной системы счисления. Полученные результаты открывают возможность для эффективной аппаратной реализации цифровых фильтров на современных устройствах (FPGA, ASIC и др.) для решения практических задач, таких как шумоподавление, усиление и подавление частот, интерполяция, децимация, эквализация и многих других.

В статье [15] рассматривается проблема оценки спектральной корреляционной функции (СКФ), которая обеспечивает количественную характеристику в частотной области случайных процессов, рассматриваемых в качестве теоретических моделей наблюдаемых временных рядов или дискретно-временных сигналов. Кратко рассматриваются теоретические основы оценки СКФ, чтобы подчеркнуть важное различие между шириной ячейки разрешения в бичастотной плоскости и шагом между центрами соседних ячеек.

Под цифровым фильтром (ЦФ) в общем случае понимается система, преобразующая один

цифровой сигнал в другой. ЦФ реализуется или как программа на ЭВМ, или аппаратным способом в виде цифровой схемы, содержащей ПЛИС. Кроме того, он может быть реализован и на специализированном цифровом устройстве – цифровом сигнальном процессоре. Фильтры являются основой для большинства приложений обработки сигналов [16].

Типичное назначение – это извлечение или вырезка области спектра входного сигнала или определенной частоты. Используемые для кондиционирования сигналов фильтры нередко называются частотно-селектирующими, поскольку обычно разрабатываются на основе требований к частотной характеристике [17].

Анализ состояния и тенденций развития теории и практики цифровой фильтрации показывает, что основными используемыми методами являются частотная селекция сигналов и оптимальная (адаптивная) фильтрация.

В работе [18] представлен сравнительный анализ трех методов частотно-временного представления сигналов:

- 1) кратковременное преобразование Фурье;
- 2) вейвлет-преобразование;
- 3) декомпозиция с использованием банка фильтров на основе фазового преобразования.

Внимание уделено изучению частотно-временного покрытия, которое получается при использовании данных методов. Чтобы рассмотреть методы с единых позиций, выбрана точка зрения на частотно-временное преобразование как на результат работы банка фильтров. Особое внимание уделено объяснению механизма работы фазового преобразования, показана его связь с разложением сигнала на ортогональные дискретные последовательности Лагерра. Для визуализации конфигураций частотно-временного покрытия, получающихся при использовании указанных частотно-временных преобразований, рассчитывались прямоугольники Гейзенберга при помощи численного интегрирования соответствующих выражений.

В работе [19] рассматривается проблема синтеза формирующих линейно-фазовых КИХ-фильтров для систем цифровой связи. Фильтры передатчика и приемника системы, образующие пару, идентичны. Исследуемый метод синтеза основан на взвешенной чебышевской аппроксимации с применением алгоритма Ремеза. При этом к переходной полосе фильтра предъявляются дополнительные требования, а именно задается не одна точка контроля в этой полосе, как в ранее известном подходе, а ряд дополнительных точек на заданных частотах. Предлага-

ется вычислять уровни амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) на этих частотах лишь по одному вспомогательному параметру, который подбирается итеративно в процессе решения проблемы. Рассмотрены критерии синтеза, связанные с получением желаемых значений ослабления АЧХ в полосе задерживания, межсимвольной интерференции и отношения пиковой мощности к средней мощности сигнала на выходе фильтра. На примере показано, что надлежащим выбором числа точек контроля и их местоположения в переходной полосе можно существенно улучшить ранее полученные результаты синтеза. Затронута проблема квантования коэффициентов фильтров в процессе поиска решений. Метод синтеза иллюстрируется двумерной и трехмерной графикой.

В работе [20] рассмотрены вопросы, связанные с проблемой минимизации аппаратных затрат при программно-аппаратной реализации цифровых алгоритмов выделения частоты дискретных сигналов на программируемых логических интегральных схемах и микроэлектронных устройствах со специальными процессорами. Описаны возможные пути решения этих задач на основе использования вычислительных алгоритмов нерекурсивной цифровой фильтрации и разностной цифровой фильтрации с целочисленными коэффициентами. Приведено необходимое и достаточное условие для использования аппаратно-программной реализации вычислительного алгоритма разностной цифровой фильтрации дискретных сигналов для их многоступенчатого дискретного преобразования Фурье без выполнения арифметических операций умножения.

В [21] разработаны фильтры нижних частот с конечным и бесконечным импульсным откликом с инновационной схемой буферизации для задержки цифрового низкочастотного сигнала на угол от 0 до 180° для сигналов реального времени. Применение схемы фильтрации и буферизации на экономичном встраиваемом процессоре с ограниченными возможностями обработки сигналов открывает горизонты для ее применения во многих областях обработки сигналов. Для оценки практической применимости сгенерированный отфильтрованный выходной сигнал коррелируется с исходным сигналом (низкочастотной версией), при этом значения корреляции в некоторых случаях достигают 0,99. Новизна предложенного подхода позволяет использовать его в широком спектре областей цифровой фильтрации сигналов [21].

Вопросы очистки сигналов от шума и спектрального анализа с использованием адаптивных алгоритмов рассматриваются в статьях [22, 23].

В [24] разработан и исследован алгоритм непрерывной дискретной свертки на процессоре TMS320F28377D, реализованный на базе быстрого преобразования Фурье (БПФ). Данный алгоритм применим для навигации мобильных роботов при вычислении временных интервалов лазерных дальномеров и веерных маяковых лазерных систем. Преимуществом является невосприимчивость лазерного излучения к радиосигналам, что обеспечивает высокую помехозащищенность, в том числе и от средств радиоэлектронной борьбы. Разработан и исследован цифровой дискретный быстродействующий полосовой фильтр высоких порядков на процессоре TMS320F28377D для навигации мобильных роботов. Предлагается применение разработанного полосового фильтра в маяковых лазерных навигационных системах с целью увеличения скорости вычисления координат мобильных роботов при решении задачи быстрой свертки. Представлен оптимальный с точки зрения минимума времени вычисления алгоритм быстрой свертки на основе цифрового непрерывного полосового фильтра Баттерворта. Разработанный фильтр Баттерворта 22-го порядка реализован на цифровом сигнальном процессоре TMS320F28377D с применением двойного буфера с параллельной записью и обработкой данных от аналого-цифрового преобразователя. Особенностью реализации полосового фильтра является его работа в режиме реального времени для поиска сигналов лазеров навигационных маяков в заданной полосе частот. Для повышения скорости обработки данных использованы два модуля прямого доступа к памяти DMA, модуль ускорителя CLA процессора TMS320F28377D. Получена корреляционная функция, вычисленная в результате свертки исходного сигнала с эталонным сигналом заданной частоты и отфильтрованная фильтром низкой частоты методом скользящего среднего. Максимум вычисленной корреляционной функции показывает задержку времени между началом передачи импульсов маяка и временем приема на фотодиоде. Данное время задержки показывает азимут на маяк. Лазерная система маяков для навигации роботов по сравнению с радиотехнической аппаратурой обладает следующими преимуществами: меньшей погрешностью измерения дальности, небольшими размерами оптических систем по сравнению с размерами радиолокационных антенн и высокой

разрешающей способностью по углам за счет узкого пучка зондирующего излучения. Высокая помехоустойчивость лазерной системы маяков, в том числе к преднамеренным помехам, позволяет решать навигационные задачи в условиях подавления глобальных навигационных систем (типа GPS и ГЛОНАСС), когда средства автономной навигации не могут полностью обеспечить данными систему управления роботами. Время выполнения свертки на процессоре TMS320F28377D составляет 1,8 мс.

В [25] разработан алгоритм непрерывной дискретной свертки сигналов с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) с перекрытием для более точного определения координат транспортного робота. Представлены два метода определения координат транспортного робота в двумерном пространстве, где используется операция свертки и может быть применен данный алгоритм. В основе алгоритма лежит метод, который позволяет выполнять быстрое преобразование Фурье на нескольких вычислительных блоках параллельно, например, на цифровом сигнальном процессоре TMS320F28377D, где доступны три вычислительных блока, работающих параллельно независимо друг от друга. Использование БПФ с перекрытием позволяет обрабатывать сигнал без потерь данных, что является критическим для непрерывной обработки сигналов. Проведено исследование влияния значения смещения окна быстрого преобразования Фурье на частоту получения спектра сигнала и, как выяснилось, уменьшение смещения окна быстрого преобразования Фурье приводит к увеличению частоты получения спектра сигнала, что, в свою очередь, позволяет более точно восстанавливать амплитуду исходного сигнала, то есть будет меньше потерь данных спектра. Сравнение результатов работы алгоритма без перекрытия и с перекрытием при различных значениях смещения показало, что метод с перекрытием обеспечивает значительно более точное получение данных спектра, избегая потерь данных.

В статье [26] представлены результаты разработки математической модели и имитационного моделирования трехколесного высокоманевренного мобильного робота, который является одним из объектов, для которого требуется определение координат. Предложенная модель может быть использована для улучшения качества проектирования и испытаний алгоритмов управления и навигации в робототехнике, снижая при этом затраты на создание физических макетов роботов, а также в учебном процессе.

Алгоритм вычисления свертки двух сигналов

Формула быстрого дискретного преобразования Фурье имеет следующий вид:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-j2\pi \frac{kn}{N}},$$

где $F(k)$ – спектр сигнала; f_n – значение сигнала во временной области; N – количество значений сигнала; k – частота.

Дискретное преобразование Фурье преобразует сигнал из временной области в частотную область. Для преобразования сигнала обратно из частотной области во временную используется обратное преобразование Фурье.

Формула быстрого дискретного обратного преобразования Фурье имеет следующий вид:

$$f(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F_n e^{j2\pi \frac{kn}{N}}.$$

В общем виде свертка двух функций в дискретном виде имеет следующую формулу:

$$\omega(t) = \sum_{\tau=0}^t g(\tau) f(t - \tau) d\tau,$$

где $\omega(t)$ – свертка; $g(\tau)$ – первая функция; $f(t)$ – вторая функция; τ – смещение.

Свертка двух сигналов представляет из себя перемножение этих двух сигналов в частотной области и дальнейшего перехода от частотной области во временную.

Таким образом, сначала выполняется быстрое дискретное преобразование Фурье для первого и второго сигнала, производится умножение полученных спектров этих сигналов, и в заключение производится быстрое дискретное обратное преобразование Фурье для перевода из частотной области во временную.

Формула для расчета свертки двух сигналов выглядит следующим образом:

$$y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Y_n e^{j2\pi \frac{kn}{N}},$$

где $Y_n = F_1 F_2$; F_1 – спектр первого сигнала; F_2 – спектр второго сигнала.

Данные для обработки записываются в буфер с помощью АЦП, и если время заполнения данных для выполнения БПФ меньше, чем время выполнения БПФ, то возникает проблема, что некоторые данные с АЦП могут потеряться.

Реализация алгоритма вычисления свертки двух сигналов на процессоре TMS320F28377D

Задачами данной работы является исследование способов выполнения непрерывной свертки, а также разработка оптимального алгоритма непрерывной свертки на процессоре TMS320F28377D.

Был выбран цифровой сигнальный процессор TMS320F28377D, так как он обладает высоким быстродействием (200 млн оп/сек.), имеет необходимые модули для работы в реальном масштабе времени (8 АЦП, 6 каналов модуля пря-

мого доступа к памяти DMA, модуль ускорителя CLA).

В случае неподвижного источника прямоугольного сигнала с заданной частотой сигнал на лавинопролетном фотодиоде SAD3000NM5 представлен на рисунке 1, где по оси абсцисс показано время, а по оси ординат – значение в буфере оперативного запоминающего устройства (ОЗУ).

На рисунке 2 представлена осциллограмма принятого сигнала с лазерного маяка.

Спектр сигнала, полученный на лавинопролетном фотодиоде SAD3000NM5, показан на рисунке 3.

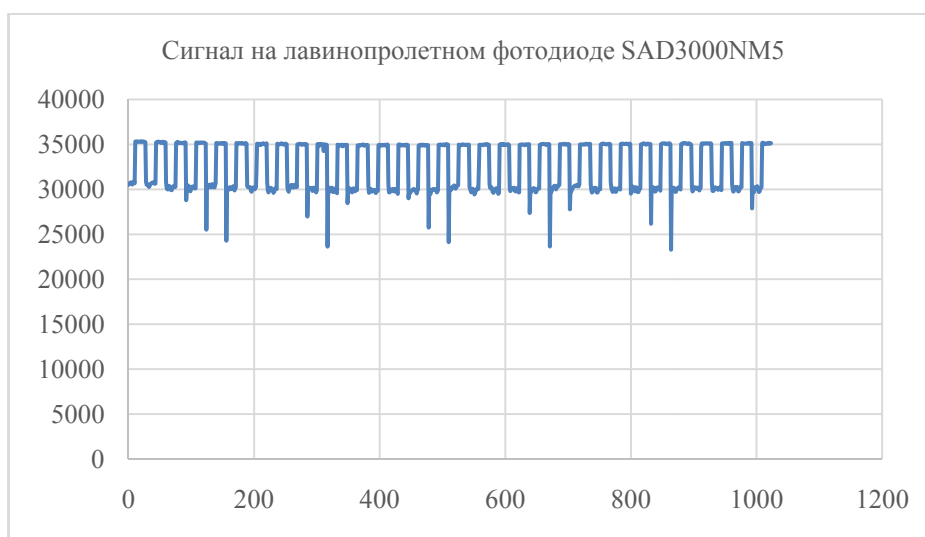


Рис. 1. Полученный сигнал на лавинопролетном фотодиоде SAD3000NM5

Fig. 1. Received signal on avalanche span photodiode SAD3000NM5



Рис. 2. Осциллограмма принятого сигнала с лазерного маяка

Fig. 2. Oscillogram of the received signal from the laser beacon

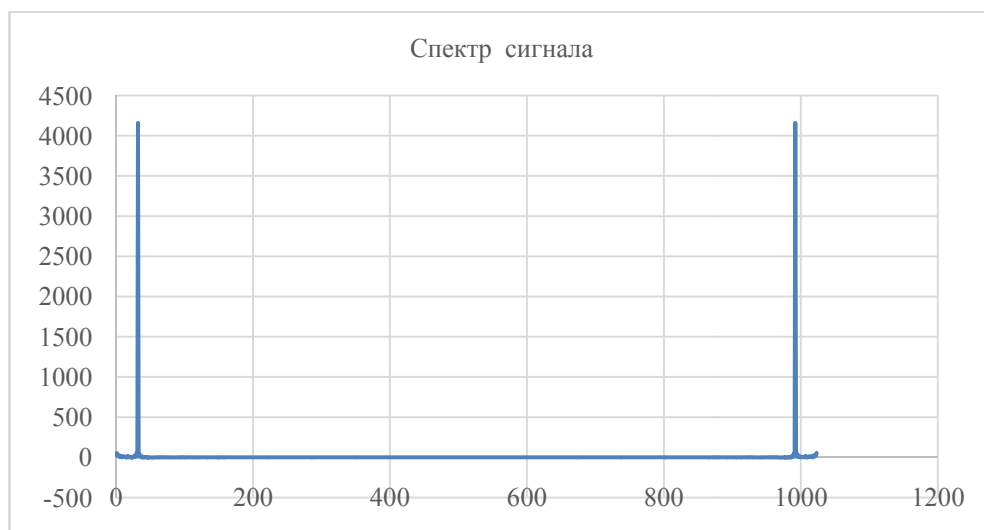


Рис. 3. Спектр сигнала, полученный на лавинопролетном фотодиоде

Fig. 3. Signal spectrum obtained at the avalanche-span photodiode

При вращающемся источнике сигнала от лазерного маяка принятый в буфер ОЗУ сигнал показан на рисунке 4, где по оси абсцисс показано время, а по оси ординат – значение в буфере ОЗУ.

На рисунке 5 представлена корреляционная функция, вычисленная в результате свертки принятого сигнала с эталонным сигналом, где по оси абсцисс показано время, а по оси ординат – значение сигнала в условных единицах.

Если частота принятого сигнала совпадает с частотой эталонного сигнала, то максимум вычисленной корреляционной функции показывает задержку времени между началом передачи импульсов маяка и временем приема на фотодиоде. Данное время может показывать как азимут на маяк, так и расстояние до маяка, если измерительная система используется для определения расстояния, т. е. в режиме дальномера.

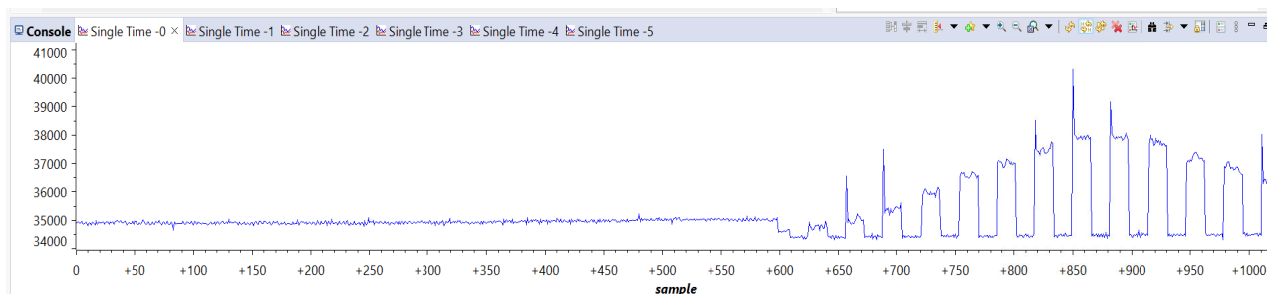


Рис. 4. Исходный сигнал, принятый в буфер ОЗУ

Fig. 4. Source signal received in the RAM buffer

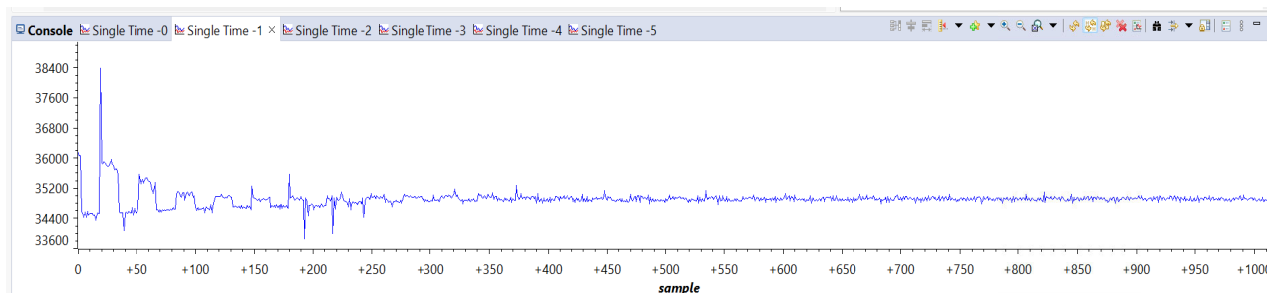


Рис. 4. (окончание)

Fig. 4. (continued)

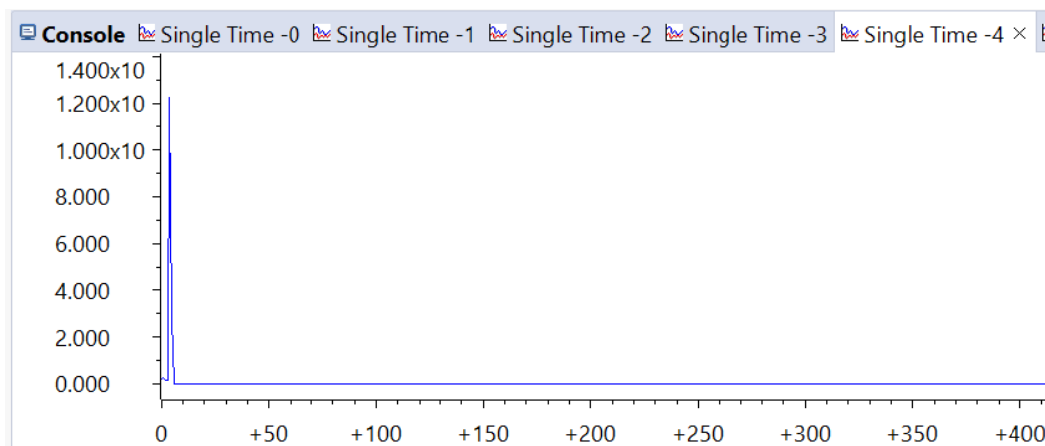


Рис. 5. Корреляционная функция, вычисленная в результате свертки принятого сигнала с эталонным сигналом, где по оси абсцисс показано время, а по оси ординат – значение сигнала в условных единицах

Fig. 5. Correlation function calculated as a result of convolution of the received signal with the reference signal, where the abscissa axis shows the time and the ordinate axis shows the signal value in conventional units

Время выполнения быстрого преобразования Фурье и свертки составляет 0,7 мс.

В качестве драйвера лазера был выбран драйвер Jolooyo DB-RGI-12V-TTL-G. Данный драйвер модулирует сигнал лазера прямоугольными импульсами с заданной частотой.

В качестве лазера был выбран инфракрасный лазер МИКРО КУБ KLi980-500. Данный лазер обладает следующими характеристиками: длина волны 980 нм, выходная оптическая мощность 500 мВт, стабильность 4 ч, наличие фокусировки. Для оптической системы была выбрана цилиндрическая линза диаметром 5 мм и круглое плоское зеркало. В качестве фотоприемника был выбран лавинный фотодиод APD IV.

Данный фотоприемник обладает следующими техническими характеристиками: напряжение питания 10 В, диапазон регулировки напряжения смещения лавинного фотодиода 25...175 В, полоса пропускания 1 кГц ... 150 МГц.

Чтобы убрать засветку и пропускать к фотоприемнику только нужное излучение в инфракрасном диапазоне с определенной длиной волны, использован фильтр GCC-202007. Данный фильтр обладает следующими характеристиками: пропускаемая длина волны 980 нм, допустимое отклонение от длины волны ± 2 нм.

В качестве фотодиода был выбран лавинопролетный фотодиод SAD3000NM5.

Для улучшения качества принимаемого сигнала и увеличения угла приема необходимо использовать линзу Френеля, которая фокусирует все излучение, падающее на площадь линзы, в одну точку, где находится фотодиод.

Для реализации экспериментов было спроектировано и изготовлено устройство лазерного

маяка. На рисунке 6 показано устройство лазерного маяка в собранном виде.



Рис. 6. Устройство лазерного маяка

Fig. 6. Laser beacon device

Особенностью данного устройства является применение бесколлекторного двигателя постоянного тока для вращения зеркала и стеклянного цилиндра. Бесколлекторный двигатель постоянного тока GBM2804H-100T имеет полое отверстие, через которое подавался модулированный с заданной частотой инфракрасный лазер на зеркало, и стеклянный цилиндр, предназначенный для преобразования узкого луча лазера в веер. Для управления двигателем был выбран драйвер SDC200. За счет удобной отладки по USB, несложному управлению драйве-

ром по CAN шине, возможности использования энкодера для обратной связи делает этот драйвер идеальным выбором. В качестве датчика для обратной связи двигателя был выбран энкодер AS5048A. Данный энкодер имеет возможность подключения по интерфейсу SPI и высокое разрешение 14 бит.

Сигнал лавинного фотодиода поступает на АЦП и последовательно записываются в буфер размером 409616-разрядных ячеек, полное заполнение буфера занимает 1,3 мс, а скорость вращения лазерного вращателя равна 4 об/сек.

Выводы

В работе представлены результаты исследования алгоритма непрерывной дискретной свертки на процессоре TMS320F28377D, реализованной на базе быстрого преобразования Фурье. Данный алгоритм использован для навигации мобильных роботов при вычислении временных интервалов лазерных дальнометров и верных маяковых лазерных систем.

Для реализации экспериментов было спроектировано и изготовлено устройство лазерного маяка. Особенностью данного устройства является применение бесколлекторного двигателя постоянного тока с полым отверстием, через которое подавался модулированный с заданной частотой инфракрасный лазер на зеркало и стеклянный цилиндр, предназначенный для преобразования узкого луча лазера в веер.

Особенностью реализации дискретной свертки является его работа в режиме реального времени для поиска сигналов лазерных маяков с заданной частотой.

В программе реализовано одновременное преобразование аналогового сигнала оптического приемника при помощи встроенного АЦП, запись цифрового сигнала в один из двух буферов и параллельные вычисления в другом буфере быстрой свертки на процессоре и сопроцессоре на ассемблере.

Для повышения скорости обработки данных использованы два модуля прямого доступа к памяти DMA, модуль ускорителя CLA процессора TMS320F28377D. Получена корреляционная функция, вычисленная в результате свертки исходного сигнала с эталонным сигналом прямоугольной формы с заданной частотой. Максимум вычисленной корреляционной функции показывает задержку времени между началом передачи импульсов маяка и временем приема на фотодиоде. Данное время задержки показывает азимут на маяк.

Цель разработки устройства лазерного маяка и исследования алгоритма непрерывной дис-

кретной свертки на процессоре TMS320F28377D была достигнута. Время записи сигнала из канала АЦП в буфер памяти процессора с модулем прямого доступа к памяти DMA составило 1,3 мс. Время выполнения быстрого преобразования Фурье и свертки – 0,7 мс на процессоре TMS320F28377D.

Таким образом, при параллельном вычислении непрерывной дискретной свертки время выполнения быстрого преобразования Фурье и свертки меньше, чем время записи сигнала из канала АЦП в буфер памяти процессора, что гарантирует отсутствие пропущенных сигналов и возможность корректно определять положение мобильного робота по инфракрасным лазерным сигналам от маяков.

Библиографические ссылки

1. Pavlov A.V. (2020) Regularity of the transform of Laplace and the transform of Fourier. *Mathematical Physics and Computer Simulation*, vol. 23, no. 4, pp. 13-18. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2020.4.2. EDN DKKNUS
2. Исследование спектрального анализа и синтеза сигналов на основе преобразования Фурье / Т. А. Гиш, В. С. Пелешенко, А. С. Медведева, Н. В. Ржевская // *Auditorium*. 2023. № 2(38). С. 87–91. EDN CFYHFO
3. Го Л., Чжоу П. Применение быстрого преобразования Фурье в микропроцессорных устройствах РЗА // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 8. С. 97–99. EDN SEFRAS
4. Алексашикина А. А., Костромин А. Н., Несцеренко Ю. В. О быстром алгоритме вычисления преобразования Фурье // *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика*. 2021. № 3. С. 36–41. EDN UIVZTB
5. Альтман Е. А., Александров А. В. Анализ зависимости быстродействия быстрого преобразования Фурье от объема обрабатываемых данных // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2023. № 1 (89). С. 136–143. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_1_136. EDN KKLKUI
6. Ju. Fusic S., Sugumari T. (2023) A Review of Perception-Based Navigation System for Autonomous Mobile Robots. *Recent Patents on Engineering*, vol. 17, no. 6. DOI: 10.2174/1872212117666220929142031. EDN HDUWNC
7. Sh. Shentu, Zh. Gong, X. Ju. Liu (2022) Hybrid Navigation System Based Autonomous Positioning and Path Planning for Mobile Robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 109. DOI: 10.1186/s10033-022-00775-4. EDN QAWFNG
8. Volná E., Kotyba M., Bradac V. (2020) Soft Computing-Based Control System of Intelligent Robot Navigation. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 12034 LNAI, pp. 379-390. DOI: 10.1007/978-3-030-42058-1_32. EDN BKKUXO
9. Galati R., Mantriota G., Reina G. (2022) RoboNav: An Affordable Yet Highly Accurate Navigation

System for Autonomous Agricultural Robots. *Robotics*, vol. 11, no. 5, p. 99. DOI: 10.3390/robotics11050099. EDN JNMYXE

10. Raj R., Kos A. (2024) Discussion on different controllers used for the navigation of mobile robot. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, pp. 229-239. DOI: 10.24425/ijet.2024.149535. EDN TNFUJF

11. Arce D., Solano Ja., Beltrán C. (2023) A Comparison Study between Traditional and Deep-Reinforcement-Learning-Based Algorithms for Indoor Autonomous Navigation in Dynamic Scenarios. *Sensors*, vol. 23, no. 24, p. 9672. DOI: 10.3390/s23249672. EDN TANWEX

12. Ван Ю. Исследование навигационной системы на базе колесного мобильного робота Mecanum // *StudNet*. 2022. Т. 5, № 3. EDN UIQMYS

13. Ferreira M.A., Moreira L.C., Lopes A.M. (2024) Autonomous Navigation System for a Differential Drive Mobile Robot. *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 52, no. 2, pp. 841-852. DOI: 10.1520/jte20230191. EDN UYPUDM

14. Высокопроизводительная цифровая фильтрация на модифицированных умножителях с накоплением в системе остаточных классов с модулями специального вида / П. А. Ляхов, А. С. Ионисян, М. В. Валуева, А. С. Ларикина // *Информационные технологии*. 2021. Т. 27, № 4. С. 171–179. DOI: 10.17587/it.27.171-179. EDN IVDZOW

15. Shevgunov T., Efimov E., Guschina O. (2023) Estimation of a Spectral Correlation Function Using a Time-Smoothing Cyclic Periodogram and FFT Interpolation - 2N-FFT Algorithm. *Sensors*, vol. 23, no. 1, p. 215. DOI: 10.3390/s23010215. EDN FDRZBN

16. Singh P., Gupta A., Joshi Sh. (2022) General Parameterized Fourier Transform: A Unified Framework for the Fourier, Laplace, Mellin and Z Transforms: *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 70, pp. 1295-1309. DOI: 10.1109/tsp.2022.3152607. EDN UPPMTU

17. Кошелева Д. Д., Доронина А. В. Преобразование Фурье и быстрое преобразование Фурье // *Инновации. Наука. Образование*. 2021. № 38. С. 626–632. EDN XUEDEM.

18. Вашикевич М. И., Азаров И. С. Сравнение частотно-временных преобразований: Фурье анализ, вейвлеты и банки фильтров на основе фазового преобразования // *Цифровая обработка сигналов*. 2020. № 2. С. 13–26. EDN MLRFPZ

19. Мингазин А. Т. Улучшенный синтез формирующих КИХ-фильтров для систем цифровой связи // *Цифровая обработка сигналов*. 2024. № 1. С. 12–20. EDN SIFTJG

20. Burova A.Yu., Usatenko T.O. (2020) Digital algorithms for the discrete frequency selection of signals that do not use algorithmic multiplication operations. *TEM Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 501-506. DOI: 10.18421/TEM92-11. EDN EWQQIZ

21. Hamza A.R., Hussein M.A. (2024) An Innovative Embedded Processor-Based Signal Phase Shifter Algorithm. *ARO: The Scientific Journal of Koya University*,

vol. 12, no. 1, pp. 19-28. DOI: 10.14500/aro.11358. EDN XRYUDN

22. Voznesensky A., Kaplun D. (2019) Adaptive Signal Processing Algorithms Based on EMD and ITD: *IEEE Access* - 2019, vol. 7, pp. 171313-171321

23. Kaplun D., Voznesensky A., Romanov S. (2020) Classification of Hydroacoustic Signals Based on Harmonic Wavelets and a Deep Learning Artificial Intelligence System. *Applied Sciences (Switzerland)*, no. 10 (9), p. 3097.

24. Трефилов С. А., Никитин Ю. Р., Пономарев Д. А. Исследование цифрового дискретного быстрого действия полосового фильтра высоких порядков на процессоре TMS320F28377D для навигации мобильных роботов // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2024. Т. 27, № 4. С. 55–69. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-55-69. EDN HIIVHS

25. Трефилов С. А., Пономарев Д. А. Свертка непрерывного сигнала с использованием быстрого преобразования Фурье с перекрытием для определения координат транспортного робота // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2024. Т. 27, № 3. С. 4–15. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-4-15. EDN OSDFLB

26. Трефилов С. А., Ходырев Г. В. Разработка математической модели высокоманевренного робота для имитации роботов различных типов конструкций // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2024. Т. 27, № 3. С. 38–48. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-38-48. EDN COTTDJ

References

1. Pavlov A.V. (2020) Regularity of the transform of Laplace and the transform of Fourier. *Mathematical Physics and Computer Simulation*, vol. 23, no. 4, pp. 13-18. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2020.4.2. EDN DKKNUS

2. Gish T.A., Peleshenko V.S., Medvedeva A.S., Rzhetskaya N.V. (2023) [Study of spectral analysis and synthesis of signals based on Fourier transform]. *Auditorium*, no. 2 (38), pp. 87-91 (in Russ.).

3. Guo L., Zhou P. (2021) [Application of fast Fourier transform in microprocessor-based relay protection devices]. *Innovacii i investicii*, no. 8, pp. 97-99 (in Russ.).

4. Aleksashkina A.A., Kostromin A.N., Nesterenko Yu.V. (2021) [On a fast algorithm for computing the Fourier transform]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika*, no. 3, pp. 36-41 (in Russ.).

5. Altman E.A., Alexandrov A.V. (2023) [Analysis of dependence of fast Fourier transform performance on the volume of processed data]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*, no. 1 (89), pp. 136-143. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_1_136 (in Russ.).

6. Ju. Fusic S., Sugumari T. (2023) A Review of Perception-Based Navigation System for Autonomous Mobile Robots. *Recent Patents on Engineering*, vol. 17, no. 6. DOI: 10.2174/1872212117666220929142031. EDN HDUWNC

7. Sh. Shentu, Zh. Gong, X. Ju. Liu (2022) Hybrid Navigation System Based Autonomous Positioning and

- Path Planning for Mobile Robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 109. DOI: 10.1186/s10033-022-00775-4. EDN QAWFNG
8. Volná E., Kotyrba M., Bradac V. (2020) Soft Computing-Based Control System of Intelligent Robot Navigation. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 12034 LNAI, pp. 379-390. DOI: 10.1007/978-3-030-42058-1_32. EDN BKKUXO
9. Galati R., Mantriota G., Reina G. (2022) RoboNav: An Affordable Yet Highly Accurate Navigation System for Autonomous Agricultural Robots. *Robotics*, vol. 11, no. 5, pp. 99. DOI: 10.3390/robotics11050099. EDN JNMYXE
10. Raj R., Kos A. (2024) Discussion on different controllers used for the navigation of mobile robot. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, pp. 229-239. DOI: 10.24425/ijet.2024.149535. EDN TNFUJF
11. Arce D., Solano Ja., Beltrán C. (2023) A Comparison Study between Traditional and Deep-Reinforcement-Learning-Based Algorithms for Indoor Autonomous Navigation in Dynamic Scenarios. *Sensors*, vol. 23, no. 24, p. 9672. DOI: 10.3390/s23249672. EDN TANWEX
12. Wang Y. (2022) [Study of navigation system based on Mecanum wheeled mobile robot]. *StudNet*, vol. 5, no. 3 (in Russ.)
13. Ferreira M.A., Moreira L.C., Lopes A.M. (2024) Autonomous Navigation System for a Differential Drive Mobile Robot. *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 52, no. 2, pp. 841-852. DOI: 10.1520/jte20230191. EDN UYPUDM
14. Lyakhov P.A., Ionisyan A.S., Valueva M.V., Larikova A.S. (2021) [High performance digital filtering on modified multipliers with accumulation in residual class system with special kind modules]. *Informacionnye tekhnologii*, vol. 27, no. 4, pp. 171-179. DOI: 10.17587/it.27.171-179 (in Russ.)
15. Shevgunov T., Efimov E., Guschina O. (2023) Estimation of a Spectral Correlation Function Using a Time-Smoothing Cyclic Periodogram and FFT Interpolation - 2N-FFT Algorithm. *Sensors*, vol. 23, no. 1, p. 215. DOI: 10.3390/s23010215. EDN FDRZBN
16. Singh P., Gupta A., Joshi Sh. (2022) General Parameterized Fourier Transform: A Unified Framework for the Fourier, Laplace, Mellin and Z Transforms: *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 70, pp. 1295-1309. DOI: 10.1109/tsp.2022.3152607. EDN UPPMTU
17. Kosheleva D.D., Doronina A.V. (2021) [Fourier transform and fast Fourier transform]. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie*, no. 38, pp. 626-632 (in Russ.)
18. Vashkevich M.I., Azarov I.S. (2020) [Comparison of time-frequency transforms: Fourier analysis, wavelets and phase-transform based filter banks]. *Cifrovaya obrabotka signalov*, no. 2, pp. 13-26 (in Russ.)
19. Mingazin A.T. (2024) [Improved synthesis of FIR shaping filters for digital communication systems]. *Cifrovaya obrabotka signalov*, no. 1, pp. 12-20 (in Russ.)
20. Burova A.Yu., Usatenko T.O. (2020) Digital algorithms for the discrete frequency selection of signals that do not use algorithmic multiplication operations. *TEM Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 501-506. DOI: 10.18421/TEM92-11. EDN EWQQIZ
21. Hamza A.R., Hussein M.A. (2024) An Innovative Embedded Processor-Based Signal Phase Shifter Algorithm. *ARO. The Scientific Journal of Koya University*, vol. 12, no. 1, pp. 19-28. DOI: 10.14500/aro.11358. EDN XRYUDN
22. Voznesensky A., Kaplun D. (2019) Adaptive Signal Processing Algorithms Based on EMD and ITD: *IEEE Access* - 2019, vol. 7, pp. 171313-171321.
23. Kaplun D., Voznesensky A., Romanov S. (2020) Classification of Hydroacoustic Signals Based on Harmonic Wavelets and a Deep Learning Artificial Intelligence System. *Applied Sciences* (Switzerland), no. 10 (9), p. 3097.
24. Trefilov S.A., Nikitin Yu.R., Ponomarev D.A. (2024) [Study of Digital Discrete Fast High Order Band-pass Filter on TMS320F28377D Processor for Mobile Robot Navigation]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 55-69. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-55-69 (in Russ.)
25. Trefilov S.A., Ponomarev D.A. (2024) [Continuous Signal Convolution Using FFT with Overlap for Transportation Robot Coordinate Determination]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 3, pp. 4-15. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-4-15 (in Russ.)
26. Trefilov S.A., Khodyrev G.V. (2024) [Development of a Mathematical Model of a Highly Maneuverable Robot for Simulation of Robots with Different Types of Designs]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 3, pp. 38-48. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-38-48 (in Russ.)

Study of Continuous Discrete Convolution Algorithm on Digital Signal Processor

S.A. Trefilov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Yu.R. Nikitin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

D.A. Ponomarev, JSC "Izhevsk Radio Plant", Izhevsk, Russia

Continuous discrete convolution is an important tool in modern robot navigation systems due to its ability to process signals efficiently. Modern robot navigation systems use various filtering and data integration techniques such as the Kalman filter or the Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM) algorithm. However, continuous discrete convolution complements these approaches. A continuous discrete convolution algorithm based on Fast Fourier Transform (FFT) has been developed, which allows processing large amounts of data in real time, which is critical for robot navigation. Since the signals from the avalanche photodiode are continuously converted using an

ADC and written to a buffer, they are time series. Continuous discrete convolution, which takes into account the time sequence of the data, is well suited for an analysing such data and extracting useful information from it. A continuous discrete convolution algorithm on the TMS320F28377D processor, implemented on the basis of the FFT of laser range finder time series and fan beacon laser systems, has been investigated. The peculiarity of the discrete convolution implementation is its real-time operation for searching beacon laser signals with a given frequency. The program implements simultaneous conversion of the analogue signal of the optical receiver using the built-in ADC, recording of the digital signal into one of two buffers and parallel calculations in the other buffer of the fast convolution on the processor and coprocessor TMS320F28377D in assembly language. Two direct memory access DMA modules, the CLA accelerator module of the TMS320F28377D processor are used to increase the processing speed. The correlation function calculated as a result of convolution of the initial signal with a reference signal of rectangular form with a given frequency is obtained. The maximum of the calculated correlation function shows the time delay between the beginning of beacon pulse transmission and the time of reception at the photodiode. This delay time shows the azimuth to the beacon.

Keywords: discrete signal convolution, fast Fourier transform, correlation function, digital signal processor, laser, beacon.

Получено 07.04.2025

Образец цитирования

Трефилов С. А., Никитин Ю. Р., Пономарев Д. А. Исследование алгоритма непрерывной дискретной свертки на цифровом сигнальном процессоре // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 2. С. 38–49. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-38-49

For Citation

Trefilov S.A., Nikitin Yu.R., Ponomarev D.A. (2025) [Study of Continuous Discrete Convolution Algorithm on Digital Signal Processor]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 2, pp. 38-49. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-38-49 (in Russ.)