

УДК 53.083.92

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-55-69

## Исследование цифрового дискретного быстродействующего полосового фильтра высоких порядков на процессоре TMS320F28377D для навигации мобильных роботов

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

*Разработан и исследован алгоритм непрерывной дискретной свертки на процессоре TMS320F28377D, реализованный на базе быстрого преобразования Фурье. Данный алгоритм применен 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 и 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 данную систему управления роботами. Время выполнения свертки на процессоре TMS320F28377D составляет 1,8 мс.*

**Ключевые слова:** полосовой фильтр, процессор TMS320F28377D, корреляционная функция, свертка сигнала, маяковые лазерные системы.

### Введение

В последнее время мобильные роботы (МР) находят всё большее применение в промышленности, сельском хозяйстве, для транспортировки грузов, исследования космоса и океана. Актуальность разработки высокоманевренных мобильных роботов, способных автономно функционировать в различных условиях, в том числе в условиях опасных для жизни человека, объясняется тем, что имеется ряд важных задач во многих областях науки и техники, например, работа в зоне радиоактивного или химического загрязнения, которые невыполнимы без участия роботов. Для функцио-

нирования МР в автоматическом режиме необходимы навигационные системы. Предложена навигационная система, состоящая из четырех инфракрасных лазерных маяков, расположенных в вершинах прямоугольника и излучающих вращающийся лазерный луч заданной частоты, развернутый с помощью стеклянного цилиндра в веер.

Новизна работы заключается в применении алгоритма обработки данных – фильтрации сигнала на базе полосового фильтра Баттерворта высоких порядков одновременно с записью сигнала в оперативную память процессора TMS320F28377D из встроенного аналого-цифро-

вого преобразователя (АЦП) с использованием прямого доступа к памяти DMA и оптимальном алгоритме буферизации сигнала записи в оперативную память процессора.

В данной работе решены следующие задачи:

- исследование управляемости полосой пропускания фильтра;
- исследование управляемости центральной частотой пропускания фильтра.

**Цель** исследования – определение возможности фильтрации сигнала на базе полосового фильтра Баттерворта высоких порядков с помощью цифрового сигнального процессора для применения в лазерных системах маяков для навигации и высокоточного определения координат МР.

### **Обзор научной литературы по навигационным системам мобильных роботов**

В статье [1] 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 [2] представлена полная гибридная навигационная система для класса мобильных роботов с задачами загрузки и стыковки. 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 наведения для удовлетворения различных требований к применению и точности в условиях различных расстояний. На основе кривой Безье предложена схема планирования траектории и разработан контроллер движения, который заставляет мобильного робота следовать целевой траектории. Для обработки сигналов наведения и управляющих сигналов контроллера движения используется фильтр Калмана. Результаты исследования подтверждают эффективность гибридной навигации, которая может быть использована в автономной складской логистике и мультимобильной робототехнической системе.

Работа [3] 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 [4] 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 [5] проведен анализ литературы по навигационным стратегиям, используемых МР. Выбраны будущие направления исследований и возможные проблемы, связанные с оптимизацией навигационной системы МР.

Работа [6] посвящена обзору различных алгоритмов автономной навигации МР, 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 [7] 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 [8] предлагается навигационная система для недорогого мобильного робота. От-

дельный малогабаритный компьютер Raspberry Pi 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.

В работе [9] рассмотрено использование локальной навигации группы подвижных объектов (ПО) в условиях радиоподавления глобальных навигационных спутниковых систем для обеспечения ситуационной осведомленности. При этом координаты ПО определяются с помощью четырех разнесенных в пространстве опорных приемопередатчиков, а для взаимной осведомленности о координатах всех ПО группы требуется обмен информацией между объектами группы. Предложен способ обеспечения ситуационной осведомленности группы ПО, основанный на применении опорной навигационной станции, оборудованной радиопеленгатором. Проведено исследование представленного способа, в результате которого установлено следующее.

1. Данный способ обеспечивает точность позиционирования контролируемого ПО на борту контролирующего ПО до 10 м при нахождении контролируемого объекта в пределах межфокусного пространства угломерно-разностно-дальномерной системы, образованной опорной навигационной станцией и контролирующим ПО.

2. При выходе контролируемого объекта за пределы межфокусного пространства наблюдается деградация точностных характеристик до 100 м, что связано с увеличением значений геометрического фактора. Показано, что в рассматриваемой системе точность оценки задержки запросных и ответных сигналов должна быть не хуже  $5 \cdot 10^{-7}$  с, а погрешность измерения азимутального угла в радиопеленгаторе опорной навигационной станции не должна превышать 3...5 град. Выявлен недостаток рассматриваемого способа – наличие слепых зон, который может быть устранен изменением конфигурации системы за счет перемещения контролирующего ПО. Представленный способ может быть использован на практике для обеспечения ситуационной осведомленности группы ПО локальной системы связи специального назначения.

В статье [10] дан обзор различных систем посадки, которые используются для приведения пилотируемых и беспилотных летательных ап-

паратом. Рассмотрены как радиотехнические системы приведения (курсогладкие, спутниковые и др.), так и альтернативные (оптические и лазерные). Сделаны выводы о применимости известных и перспективных систем посадки для решения задач обеспечения автоматической посадки беспилотных аппаратов в различных условиях.

В работах [11, 12] рассмотрены отдельные существующие и перспективные средства оптико-электронной разведки, наиболее удовлетворяющие по своим характеристикам требованиям войск национальной гвардии Российской Федерации.

В статье [13] проведен обзор лазерных комплексов обнаружения оптических и оптико-электронных средств разведки зарубежных стран, проанализированы их основные параметры и определены характерные особенности.

В книге [14] представлены разработки, выполненные в Центральном научно-исследовательском институте автоматики и гидравлики. Дано систематизированное изложение основных работ Института по созданию высокоточных систем управления, наведения и приводов для широкой номенклатуры образцов вооружения и военной техники всех видов Вооруженных сил Российской Федерации, а также для общепромышленного машиностроения.

В статье [15] рассмотрено измерение и минимизация в автоматическом режиме углового рассогласования оси зондирующего пучка с осью пучка маркерного излучения, имитирующего оптическую ось приемного канала лазерной локационной системы. Основное внимание уделяется исследованию характеристик базовых элементов измерительной системы (лазерных излучателей, управляемых оптико-механических элементов и датчиков, измеряющих угловое положение лазерных пучков), применение которых способно обеспечить угловое согласование осей зондирующего и маркерного пучков с прецизионной точностью. Основные результаты включают оригинальную лазерную установку, созданную для полунатурного моделирования углового согласования осей диаграммы направленности зондирующего (1064 нм) и маркерного (671 нм) излучений лазерной локационной системы с рассогласованием осей не более одной угловой секунды. Установка обеспечивает периодическую ретрансляцию изображений лазерных пучков на поляризационный узел сопряжения их осей с помощью пространственных фильтров. С ее помощью получены экспериментальные данные о позиционных

характеристиках квадрантного фотодиода и цифровой камеры с матрицей КМОП, используемых в узле согласования лазерных пучков. Показано, что использование такой цифровой камеры предпочтительнее, поскольку не требует знания ее позиционной характеристики. Выявлено произвольное рассогласование совмещенных лазерных пучков, связанное с угловой нестабильностью генерируемого лазерного излучения. Показана возможность автоматизированного управления угловым совмещением осей импульсного зондирующего и непрерывного маркерного лазерных излучений с помощью моторизованного зеркала, установленного вне оптической схемы маркерного излучателя, а также предложен алгоритм функционирования маркерного излучателя в этом режиме. Научная новизна работы определяется оригинальностью измерительной лазерной установки, полученными с ее помощью экспериментальными данными о характеристиках элементной базы канала маркерного излучения и возможностью автоматизированного управления угловым совмещением осей импульсного и непрерывного лазерных излучений с применением моторизованных зеркал.

В статье [16] представлено описание разработанной имитационной модели импульсного лазерного дальномера, установленного на самолете-носителе. Описаны основные структурные части данной модели. На примере трех оптико-геометрических моделей различных аэродинамических объектов оценены оптимальные длительность лазерного импульса и частота выборки фотоприемного устройства лазерного дальномера, в качестве критериев выбраны максимальная дальность работы и точность измерения дальности.

#### **Обзор научной литературы по цифровой обработке сигналов для навигационных систем**

Вопросы цифровой обработки сигналов, включая построение эффективных алгоритмов цифровой фильтрации и синтез банков фильтров, рассматриваются в многочисленных трудах. В статье [17] 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 ап-

паратные 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 [18] рассматривается проблема оценки спектральной корреляционной функции (СКФ), которая обеспечивает количественную характеристику в частотной области широкочувствительных циклостационарных свойств 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 элементе – цифровом сигнальном процессоре. Фильтры являются основой для большинства приложений обработки сигналов [19].

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 [20].

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 [21] представлен сравнительный анализ трех методов частотно-временного представления сигналов:

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

Внимание уделено изучению частотно-временного покрытия, которое получается при использовании данных методов. Чтобы рассмот-

реть 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 [22] 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. Предлагается вычислять уровни 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 [23] 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 вычисли-

тельного алгоритма разностной цифровой фильтрации дискретных сигналов для их многоступенчатого дискретного преобразования Фурье без выполнения арифметических операций умножения.

Цифровая фильтрация сегодня широко используется во многих прикладных областях, а с ростом использования недорогих встраиваемых процессоров она может быть применена в самых разных областях. Недостатком алгоритмов цифровой фильтрации является внесение сдвига фазового угла в отфильтрованные сигналы, что приводит к появлению нежелательных характеристик во многих прикладных областях. В представленной статье 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 град 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 [24].

Вопросы очистки сигналов от шума и спектрального анализа с использованием адаптивных алгоритмов рассматриваются в статьях [25, 26].

В статье [27] для очистки сигналов от шума предлагается использование алгоритма EMD. Использование EMD обеспечивает высокое качество очистки сигналов от шума в сравнении с известными техниками, такими как вейвлет-преобразование и адаптивный фильтр Винера.

В работе [28] рассматривается представление ЦФ полосового и режекторного типов каскадной структуры, элементарные блоки которых имеют либо четвертый, либо второй порядок. Проводится расчет дисперсии собственных шумов квантования.

В статье [29] рассматриваются методы снижения числа операций при выполнении цифровой фильтрации изображения, исследуются известные методы разложения двумерной свертки в несколько сверток с меньшим числом элементов применительно к задаче цифровой фильтрации. На основании приведенного в статье раз-

ложения двумерной свертки можно повысить быстродействие некоторых алгоритмов обработки изображений при разбиении изображения на несколько блоков размером, соответствующим ядру фильтра.

В [30] 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 идет 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 и частое получение данных спектра, избегая потерь данных.

В статье [31] 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.

Анализ опубликованных работ показывает, что разработка новых адаптивных эффективных методов и алгоритмов фильтрации шумов и спектрального анализа остается актуальной.

При создании устройств цифровой обработки сигнала на первое место всегда ставится элементная база. В настоящее время большинство разработчиков используют для реализации алгоритмов обработки цифровые сигнальные процессоры (ЦСП) общего назначения. Их главными преимуществами являются гибкость базирующихся на них систем, а также возможность реализации адаптивных и обучающих алгоритмов.

Вместе с тем ЦСП имеют ряд недостатков, которые, безусловно, приходится учитывать при разработке новых изделий. Во-первых, тактовая частота ЦСП не превышает 30...50 МГц, что ограничивает их область применения. Во-вторых, каждое семейство ЦСП имеет собственные коды команд, поэтому практически невозможен перенос реализованного на одном ЦСП алгоритма на процессоры других семейств или создание универсальных библиотек алгоритмов. Даже существование компиляторов с языков высокого уровня не снимает данную проблему, так как они ориентированы на конкретные ЦСП. В-третьих, при реализации сложных структур приходится увеличивать число процессоров и обеспечивать их работу в мультипроцессорном режиме.

До недавнего времени качество ЦСП определялось только скоростью выполнения операций умножения/сложения или количеством операций в секунду. Однако сегодня, при насыщенном рынке мощных ЦСП, на первое место выходят другие требования. Они связаны с архитектурными решениями процессора и расширенными функциональными возможностями – наличием высокоскоростных гибких арифметических средств, встроенных и внекристальных средств циклической буферизации и др.

Цифровые методы фильтрации широко используются для решения задач навигации. Применение ЦФ позволяет улучшать технико-экономические показатели систем передачи информации, оценивать параметры излучения. Только цифровые фильтры обеспечивают реализацию жестких норм, предъявляемых к оборудованию различного назначения современными стандартами.

### **Свертка, основанная на цифровых фильтрах**

В современных дальномерных и азимутальных навигационных системах ближнего радиуса действия МР используются лазерные дальнометры и лазерные веерные маяки, в которых применяется свертка, основанная на цифровых фильтрах:

$$r(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_e(n-m)x_s(m), \quad m, n = \overline{0, N-1}, \quad (1)$$

где  $x_e(n-m)$  – эталонный сигнал;  $x_s(m)$  – дальномерный сигнал или сигнал веерного маяка,  $m, n$  – количество дискретных отсчетов сигнала;

и дискретном преобразовании Фурье для вычисления дискретных корреляционных функций  $r(n)$ :

$$r(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_e(k)X_s(k)e^{+j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k, n = \overline{0, N-1}, \quad (2)$$

где  $X_e(k)$  – спектр эталонного сигнала;  $X_s(k)$  – спектр дальномерного сигнала или спектр сигнала маяка;  $n$  – количество дискретных отсчетов корреляционной функции;  $k$  – количество дискретных отсчетов спектра, которые позволяют измерять временные задержки дальномерных импульсов или фазу лазерных веерных маяков.

Применение БПФ позволяет существенно уменьшить количество операций в выражении (2). Эталонный спектр  $X_e(k)$  вычисляется один раз, а  $X_s(k)$  – при каждом измерении.

Для увеличения отношения сигнал/шум применим БПФ фильтр в виде

$$X_{ef}(k) = K(k)X_e(k), \quad k = \overline{0, N-1},$$

где  $K(k)$  – передаточная функция фильтра;  $X_{ef}(k)$  – фильтрованный эталонный сигнал.

Тогда (2) можно переписать в виде

$$r(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} K(k)X_e(k)X_s(k)e^{+j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k, n = \overline{0, N-1}, \quad (3)$$

$$K(k) = \begin{cases} 1, & k_c - l \leq k \leq k_c + l, \\ 0, & k \leq k_c - l, k > k_c + l, \end{cases} \quad (4)$$

где  $k_c$  – центральная дискретная частота фильтра;  $l$  – половина ширины пропускания фильтра.

Пусть эталонный сигнал  $x_e$  определен как

$$x_e(n) = \begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi}{N}k_c n\right), & n = \overline{0, P-1}, \\ 0, & n = \overline{P, N-1}. \end{cases} \quad (5)$$

Тогда отфильтрованный эталонный сигнал

$$y_e(n) = \sum_{i=0}^{l-1} a_{n-i}x_e(n-i) + \sum_{j=0}^{j-1} b_{n-j}y_e(n-j), \quad (6)$$

а спектр эталонного отфильтрованного сигнала

$$Y_e(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_e(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k, n = \overline{0, N-1}. \quad (7)$$

Пусть принят сигнал  $x_s(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , тогда дискретный спектр

$$X_s(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_s(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k, n = \overline{0, N-1}. \quad (8)$$

Корреляционная функция определяется как

$$r(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} K_1(k|k_{1\text{Э}})X_e(k)X_s(k)e^{+j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k, n = \overline{0, N-1}, \quad (9)$$

где  $X_e(k)$  – спектр эталонного сигнала;  $X_s(k)$  – спектр принятого сигнала;  $K(k)$  – функция эталонного спектра.

По максимуму корреляционной функции (9) определяется временная задержка, по которой определяем либо время прилета отраженного эталонного импульса или время фиксации веера, по которому будем вычислять азимут на веерный маяк.

Далее определяем координаты робота методом триангуляции дальномерным либо азимутальным методом. Алгоритмы автономного определения параметров угловой ориентации приведены в работе [32].

Лазерная система маяков (ЛСМ) для навигации МР при сравнении с радиотехнической аппаратурой обладают 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 ЛСМ, 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 МР.

В доступных литературных источниках слабо освещено влияние компонентной базы на характеристики ЛСМ. Бортовые ЛСМ для навигации работают в ближнем ИК-диапазоне (0,78...1,57 мкм), для которого промышленность серийно выпускает лазерные источники и фотоприемники.

В ЛСМ преимущественно применяются два метода измерения дальности: времяпролетный

и фазовый, которые определяют режим излучения – импульсный и непрерывный. Исторически первыми были разработаны ЛСМ с непрерывным режимом излучения, однако впоследствии они были вытеснены системами, излучающими в импульсном режиме. В условиях сильных помех импульсный режим излучения (времяпролетный метод измерений) обеспечивает лучшие точность и надежность результатов. Недостаток ЛСМ с непрерывным излучением также состоит в ограничении мощности подсветки лимитами энергопотребления на борту МР. Тем не менее некоторые варианты ЛСМ предусматривают использование канала с непрерывным излучением для измерений фазовым методом (на малых дальностях).

В настоящее время на рынке предлагается широкая номенклатура лазеров на AlGaAs и InGaAsP, излучающих в импульсном и непрерывном режимах, которые могут быть использованы в ЛСМ. Преимущества полупроводниковых лазеров заключаются в большом КПД (до 50...60 %), малых массе и габаритах. Однако ограниченная выходная энергия импульса и большая расходимость излучения обеспечивают дальность измерений всего до 1 км.

#### **Разработка цифрового фильтра на базе сигнального процессора**

Разработка цифрового фильтра на базе сигнального процессора включает в себя несколько этапов.

1. Определение требований: первым шагом является определение требований к цифровому фильтру, таких как тип фильтра (например, фильтр низких частот, фильтр высоких частот, полосовой фильтр и др.), частотные характеристики, разрешение, задержка и другие характеристики.

2. Выбор аппаратной платформы: выбор процессора или микроконтроллера, на котором будет реализован цифровой фильтр. Это может быть специализированный сигнальный процессор (DSP), программируемый логический контроллер (FPGA), микроконтроллер или обычный процессор общего назначения.

3. Разработка математической модели: создание математической модели цифрового фильтра, включая определение передаточной функции, разработку алгоритма фильтрации и выбор методов реализации.

4. Проектирование алгоритма: на основе математической модели разрабатывается алгоритм фильтрации, который затем будет реализован на выбранной аппаратной платформе.

5. Реализация алгоритма: написание программного кода для реализации алгоритма фильтрации на выбранной аппаратной платформе.

6. Тестирование и отладка: проведение тестирования цифрового фильтра, анализ его характеристик, определение возможных ошибок и их устранение.

7. Оптимизация производительности: в случае необходимости проведение оптимизации алгоритма и программного кода для улучшения производительности и эффективности фильтра.

8. Внедрение: интеграция цифрового фильтра в целевую систему и проведение дополнительного тестирования в реальных условиях.

Был выбран ЦСП TMS320F28377D, так как он обладает высоким быстродействием (200 млн оп./с.), имеет необходимые модули для работы в реальном масштабе времени (8 АЦП, 6 каналов модуля прямого доступа к памяти DMA, 2 модуля ускорителя CLA).

4 лазерных маяка синхронно вращаются и излучают сигнал – меандр с частотами 64, 128, 196 и 256 кГц соответственно. Цикл алгоритма ЦСП для приема и обработки сигнала соответствует одному обороту маяка. В ЦСП идут 2 параллельных процесса:

- чтения данных с АЦП в буфер 4096 слов из 16 бит с помощью модуля DMA;
- преобразование данных (4096 слов) в формат с плавающей точкой и запись в два буфера  $x$ , фильтрация на 4 полосовых фильтрах с частотами 64, 128, 196 и 256 кГц. После каждой фильтрации находится скользящее среднее и максимальное значение сигнала в данной полосе частот. Сохраняются индексы  $j$ ,  $i$  для максимального значения сигнала в данной полосе частот. Результаты в конце цикла выводятся на экран или передаются вычислителю для нахождения координат робота.

Затем после прерывания о завершении работы от модуля DMA происходит переключение на другой модуль DMA и другой буфер АЦП. АЦП работает в дифференциальном режиме. Максимальное напряжение между входами АЦП 3 В. Период дискретизации сигнала АЦП 320 нс. Время записи одного буфера с помощью модуля DMA (4096 слов из 16 бит) составляет 1,3 мс. Используются входы двух АЦП: ADCIN2, ADCIN3 и два модуля DMA1, DMA2. Сигнал запуска АЦП формируется модулем EPWM.

На рисунке 1 показан пример реализации суммы 4 сигналов (меандров) разных частот от 4 лазерных маяков.

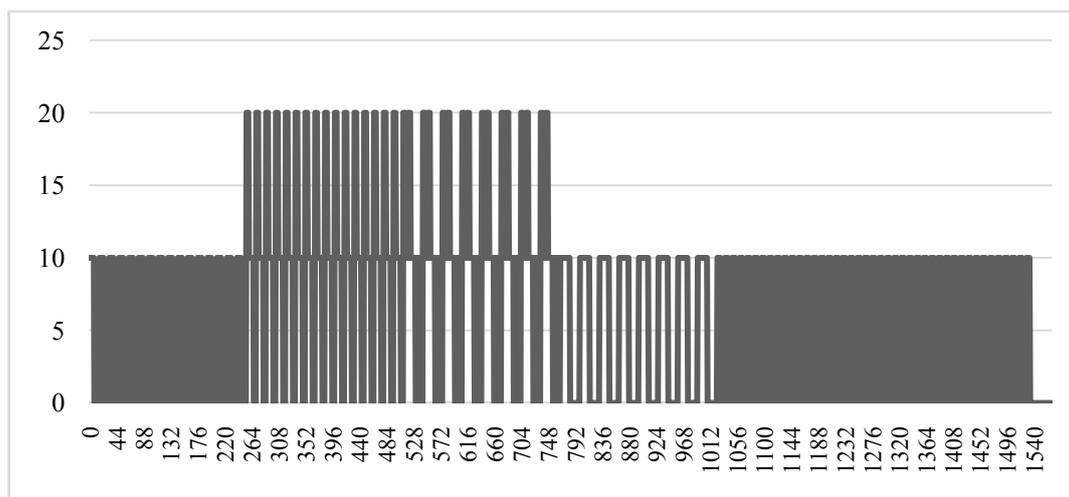


Рис. 1. Сумма 4 сигналов (меандров) разных частот от 4 лазерных маяков, по оси абсцисс – дискретные отсчеты времени (безразмерная величина), по оси ординат – относительная амплитуда сигнала

Fig. 1. Sum of 4 signals (meanders) of different frequencies from 4 laser beacons, on the abscissa axis - discrete time samples (dimensionless value), on the ordinate axis - relative amplitude of the signal

Математическая модель фильтра

$$y_n = b_0x_{n-2} + b_1x_{n-1} + b_2x_n + a_0y_{n-2} + a_1y_{n-1},$$

где  $y_n$  – отсчеты на выходе фильтра;  $x_n$  – входные отсчеты;  $a_i$  и  $b_j$  – коэффициенты числителя и знаменателя передаточной характеристики фильтра соответственно;  $a_0 = 0,1$ ;  $a_1 = -0,1$ ;  $b_0 = -0,9$ ;  $b_1 = 0$ ;  $b_2 = 0,9$ .

Количество итераций (повторений фильтрации) выбиралось экспериментально на основе соотношения качество фильтрации / вычисли-

тельные затраты. После 11 итерации качество фильтрации практически не улучшалось. На рисунке 2 приведена амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра при разных количествах итераций. Под итерацией понимается фильтрация 4096 значений с помощью полосового фильтра Баттерворта второго порядка. Например, 4 итерации означают, что выполнена 4-кратная фильтрация, когда результаты предыдущих вычислений фильтра становятся входными данными для следующей фильтрации.

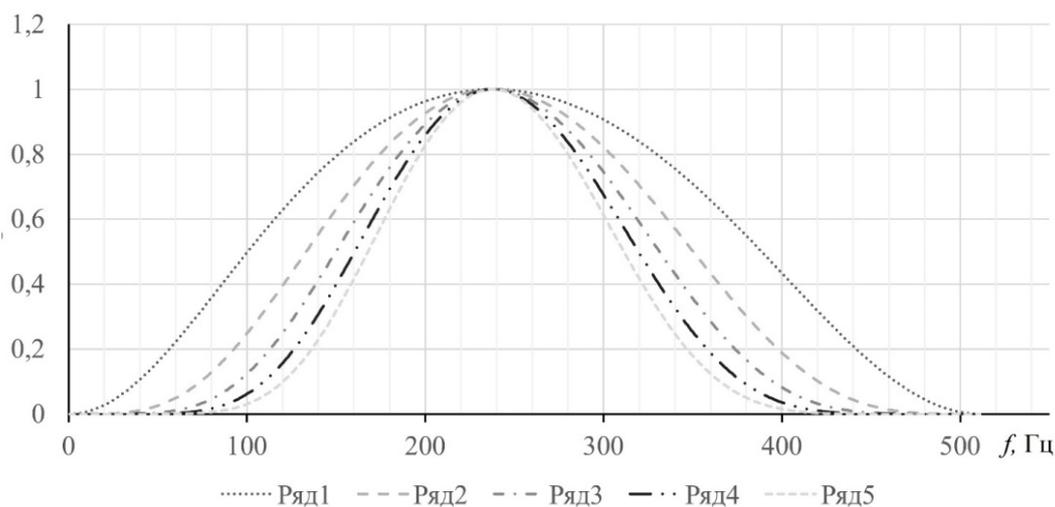


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра при разных параметрах, по оси ординат – относительная амплитуда (безразмерная величина); ряд 1 соответствует 1 итерации, ряд 2 – 4 итерациям, ряд 3 – 7 итерациям, ряд 4 – 10 итерациям, ряд 5 – 11 итерациям

Fig. 2. Amplitude-frequency response of bandpass filter at different parameters, on the ordinate axis - relative amplitude (dimensionless value), row 1 corresponds to 1 iteration, row 2 corresponds to 4 iterations, row 3 corresponds to 7 iterations, row 4 corresponds to 10 iterations, row 5 corresponds to 11 iterations

На рисунке 2 видно, что при дальнейшем увеличении количества итераций качество фильтрации практически не изменяется, но увеличивается время обработки данных. Для повышения быстродействия ЦСП TMS320F28377D выполнена оптимизация компилятора. Для этого в свойствах компилятора выбран максимальный уровень оптимизации 4. При использовании данных настроек быстродействие ЦСП увеличивается в 2 раза (время вычисления по программе уменьшилось с 5 до 2,5 мс).

#### Разработка аппаратных средств для обработки сигнала лазера

В качестве приемника излучения от лазерных маяков использовался лавинопролетный фотодиод SAD3000NM5, расположенный на мобильном роботе. Длина волны лавинопролетного фотодиода SAD3000NM5 соответствует длине волны лазерного излучения – 905 нм. Для усиления сигнала к лавинопролетному фотодиоду SAD3000NM5 подключен драйвер,

выход которого соединен с АЦП ЦСП TMS320F28377D.

В случае неподвижного источника лазерного излучения прямоугольного сигнала с заданной частотой, сигнал на лавинопролетном фотодиоде SAD3000NM5 показан на рисунке 3, где по оси абсцисс показано время в микросекундах, а по оси ординат – значение АЦП ЦСП TMS320F28377D, сохраненное в буфере ОЗУ.

Рассчитанный спектр сигнала, полученного на АЦП от лавинно-пролетного фотодиода SAD3000NM5, показан на рисунке 4.

При вращающемся источнике лазерного излучения сигнал, принятый в буфер ОЗУ, показан на рисунке 5, где по оси абсцисс показано время, а по оси ординат – значение в буфере ОЗУ.

На рисунке 6 показана 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.

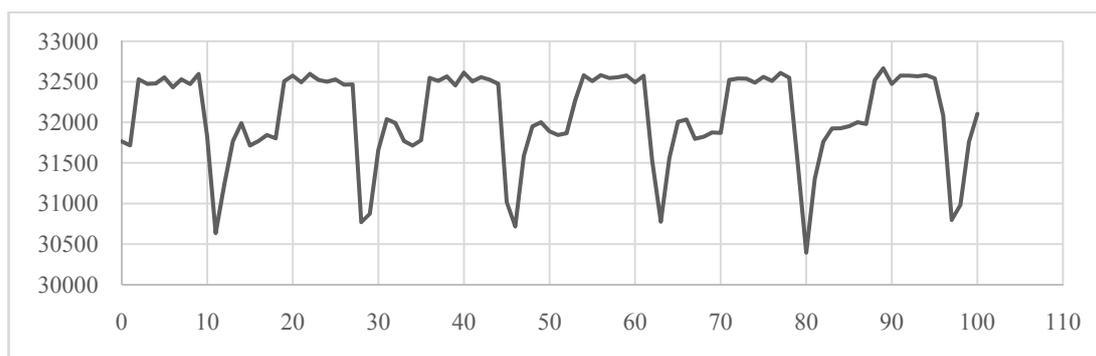


Рис. 3. Полученный сигнал на АЦП от лавинно-пролетного фотодиода SAD3000NM5, по оси абсцисс – дискретные отсчеты времени (безразмерная величина), по оси ординат – амплитуда сигнала в единицах АЦП цифрового сигнального процессора TMS320F28377D

Fig. 3. Received signal on ADC from avalanche span photodiode SAD3000NM5, on the abscissa axis - discrete time samples (dimensionless value), on the ordinate axis - signal amplitude in ADC units of digital signal processor TMS320F28377D

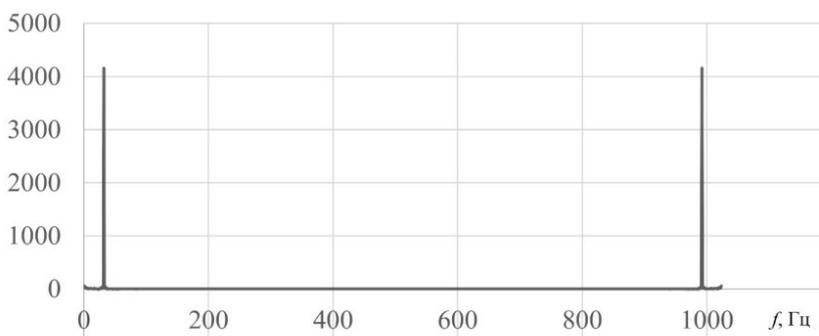


Рис. 4. Спектр сигнала, полученный на лавинно-пролетном фотодиоде, по оси ординат – амплитуда спектральных составляющих

Fig. 4. Signal spectrum obtained at the avalanche span photodiode, on the ordinate axis - amplitude of spectral components

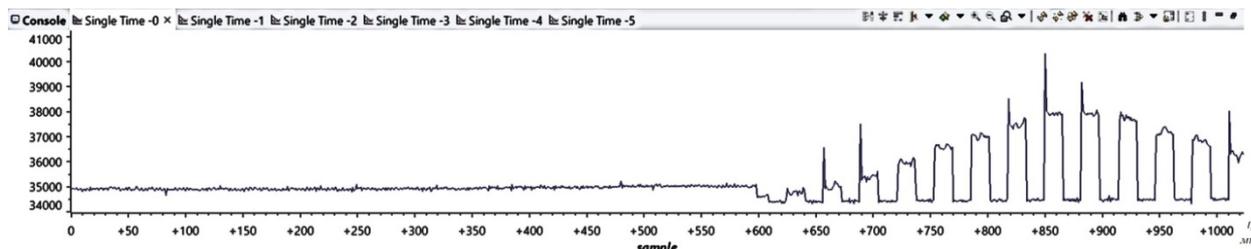


Рис. 5. Исходный сигнал, принятый в буфер ОЗУ, по оси ординат – амплитуда сигнала в единицах АЦП цифрового сигнального процессора TMS320F28377D

Fig. 5. Source signal accepted into the RAM buffer, on the ordinate axis - signal amplitude in ADC units of digital signal processor TMS320F28377D

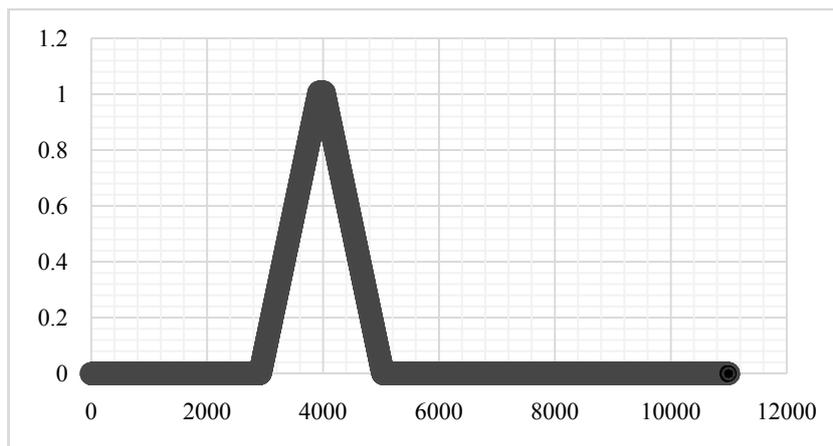


Рис. 6. Корреляционная функция, вычисленная в результате свертки принятого сигнала с эталонным сигналом, где по оси абсцисс показано время, а по оси ординат – значение сигнала в условных единицах

Fig. 6. 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

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, то есть в режиме дальномера. Время выполнения свертки составляет 1,8 мс.

**Выводы**

Представлен разработанный полосовой фильтр Баттерворта 22-го порядка, реализованный на цифровом сигнальном процессоре TMS320F28377D. Исследована полоса пропускания фильтра в зависимости от количества итераций.

Экспериментальным путем определено количество итераций (количество повторения фильтраций) полосового фильтра – 11. При меньшем значении итераций ухудшается качество фильтрации, при большем значении итераций качество фильтрации улучшается незначи-

тельно, но возрастает время обработки сигнала, что является критичным при работе в режиме реального времени для поиска сигналов заданной частоты.

Для повышения скорости обработки данных использованы два модуля прямого доступа к памяти DMA, модуль ускорителя CLA.

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 лазерного маяка заданной частоты и временем приема на фотодиоде, расположенном на мобильном роботе. Данное время задержки показывает азимут на лазерный маяк. Время выполнения свертки составляет 1,8 мс, что является хорошим параметром при работе в режиме реального времени.

Рекомендуется использовать подобные навигационные системы для определения положения мобильных роботов на расстоянии до 100 м.

## Библиографические ссылки

1. *Fusic S.Ju., 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.
2. *Shentu Sh., Gong Zh., Ju. X. Liu* (2022) Hybrid Navigation System Based Autonomous Positioning and Path Planning for Mobile Robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 35, no. 1, p. 109. DOI: 10.1186/s10033-022-00775-4. EDN QAWFNG.
3. *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.
4. *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.
5. *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.
6. *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. EDNTANWEX.
7. *Ван Ю.* Исследование навигационной системы на базе колесного мобильного робота Mecanum // *StudNet*. 2022. Т. 5, № 3. EDN UIQMYS.
8. *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. EDNUYPUDM.
9. Обеспечение ситуационной осведомленности группы подвижных объектов с использованием одной опорной навигационной станции / И. В. Шуваев, В. В. Кирюшкин, С. И. Бабусенко, А. В. Журавлев // *Радиотехника*. 2023. Т. 87, № 7. С. 5–13. DOI: 10.18127/j00338486-202307-01. EDN RDGMVW.
10. *Ясенцев Д. А.* Основные тенденции развития систем приведения беспилотных летательных аппаратов // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. 2023. Т. 193, № 2. С. 44–53. EDN QHGYPD.
11. *Бакин Е. М., Середкин Н. А., Черных А. С.* Существующие и перспективные лазерные и инфракрасные оптико-электронные средства разведки отечественного производства (часть 1) // *Военно-правовые и гуманитарные науки Сибири*. 2021. № 2 (8). С. 75–89. EDN HVCLRQ.
12. *Бакин Е. М., Середкин Н. А., Черных А. С.* Существующие и перспективные лазерные и инфракрасные оптико-электронные средства разведки отечественного производства (часть 2) // *Военно-правовые и гуманитарные науки Сибири*. 2021. № 3 (9). С. 6–15. EDN ILYLQR.
13. *Проценко О. П., Рябушев Д. Л., Кусакин М. Ю.* Обзор зарубежных лазерных комплексов обнаружения оптико-электронных средств разведки // *Стратегическая стабильность*. 2023. № 3 (104). С. 72–77. EDN WWXGXL.
14. *Шаповалов А., Солунин В., Костюков В.* Системы управления, наведения и приводы. История создания и развития. М.: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2017. 416 с. ISBN 978-5-7038-4720-6. EDN ZCUZAR.
15. Полунатурное моделирование углового согласования осей диаграммы направленности зондирующего и маркерного лазерных излучений высокоточной лазерной локационной системы / К. К. Коленчиков, В. А. Малинов, Н. И. Павлов [и др.] // *Оптический журнал*. 2022. Т. 89, № 7. С. 45–58. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-07-45-58. EDN DVIBBC.
16. *Долгих А. Е., Жидков П. М.* Модель авиационного импульсного лазерного дальномера, работающего по аэродинамическим объектам // *Труды МАИ*. 2018. № 100. С. 28. EDN ХТКWFN.
17. 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. Ларикова // *Информационные технологии*. 2021. Т. 27, № 4. С. 171–179. DOI: 10.17587/it.27.171-179. EDN IVDZOW.
18. *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.
19. *Singh P., Gupta A., Joshi Sh.D.* (2022) General Parameterized Fourier Transform: A Unified Framework for the Fourier, Laplace, Mellin and Z Transforms. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, vol. 70, pp. 1295-1309. DOI: 10.1109/tsp.2022.3152607. EDN UPPMTU.
20. *Кошелева Д. Д., Доронина А. В.* Преобразование Фурье и быстрое преобразование Фурье // *Инновации. Наука. Образование*. 2021. № 38. С. 626–632. EDN XUEDEM.
21. *Вашкевич 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.
22. *Мингазин А. Т.* Улучшенный синтез формирующих КИХ-фильтров для систем цифровой связи // *Цифровая обработка сигналов*. 2024. № 1. С. 12–20. EDN SIFTJG.
23. *Burova A.Y., Usatenko T.O.* (2020) Digital algorithms for the discrete frequency selection of signals that do not use algorithmic multiplication. *TEM Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 501-506. DOI: 10.18421/TEM92-11. EDN EWQQIZ.

24. 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.
25. Voznesensky A., Kaplun D. (2019) Adaptive Signal Processing Algorithms Based on EMD and ITD. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 171313-171321.
26. 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.
27. Обзор и сравнение алгоритмов очистки сигналов от шума / Д. Каплун, А. Вознесенский, Д. Богачевский [и др.] // Компоненты и технологии. 2019. № 1 (210). С. 114–119.
28. Гадзиковский В. И. Две формы представления полосовых и режекторных рекурсивных цифровых фильтров каскадной структуры // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 3. С. 42–48. EDN KHRHSZ.
29. Альтман Е. А., Захаренко Е. И., Васеева Т. В. Применение метода разложения двумерной свертки при реализации цифровых фильтров // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2017. № 4(69). С. 95–104. DOI: 10.17212/1814-1196-2017-4-95-104
30. 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.
31. 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.
32. Ермаков П. Г., Гоголев А. А. Программный комплекс алгоритмов автономного определения параметров угловой ориентации беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 124. С. 21. DOI: 10.34759/trd-2022-124-17
4. Galati R., Mantriota G., Reina G. (2022) Robo Nav: An Affordable Yet Highly Accurate Navigation System for Autonomous Agricultural Robots. *Robotics*, vol. 11, no. 5, p. 99. DOI: 10.3390/robotics11050099
5. 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
6. 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
7. Wan Yu. (2022) [Study of navigation system based on Mecanum wheeled mobile robot]. *Stud Net*, vol. 5, no. 3 (in Russ.).
8. 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
9. Shuvaev I.B. (2023) [Providing situational awareness of a group of mobile objects using one reference navigation station]. *Radiotekhnika*, vol. 87, no. 7, pp. 5-13 (in Russ.). DOI: 10.18127/j00338486-202307-01
10. Yasentsev D.A. (2023) [Main trends in the development of unmanned aerial vehicle guidance systems]. *Voprosy jelectromehaniki. Trudy VNIIEМ*, vol. 193, no. 2, pp. 44-53 (in Russ.).
11. Bakin E.M., Seredkin N.A., Chernykh A.S. (2021) [Existing and promising domestically produced laser and infrared optoelectronic reconnaissance equipment, part 1]. *Voенно-pravovoyei gumanitarnye nauki Sibiri*, no. 2, pp. 75-89 (in Russ.).
12. Bakin E.M., Seredkin N.A., Chernykh A.S. (2021) [Existing and promising domestically produced laser and infrared optoelectronic reconnaissance equipment, part 2]. *Voенно-pravovoyei gumanitarnye nauki Sibiri*, no. 3, pp. 6-15 (in Russ.).
13. Protchenko O.P., Ryabushev D.L., Kusakin M.Yu. (2023) [Overview of foreign laser detection complexes for optoelectronic reconnaissance equipment]. *Strategicheskaja stabil'nost'*, no. 3, pp. 72-77 (in Russ.).
14. Shapovalov A., Solunin V., Kostyukov V. (2017) [Control, guidance and drive systems. History of creation and development]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 416 p. ISBN: 978-5-7038-4720-6 (in Russ.).
15. Kolenchikov K.K., Malinov V.A., Pavlov N.I. (2022) [Semi-natural modelling of angular matching of the axes of the directional pattern of the sounding and marker laser beams of a high-precision laser localisation system]. *Opticheskij zhurnal*, vol. 89, no. 7, pp. 45-58 (in Russ.). DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-07-45-58
16. Dolgikh A.E., Zhidkov P.M. (2018) [Model of aviation pulsed laser rangefinder operating on aerodynamic objects]. *Trudy MAI*, no. 100, pp. 28 (in Russ.).
17. 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 teh-*

## References

1. 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
2. Shentu Sh., Gong Zh., Ju. X. Liu (2022) Hybrid Navigation System Based Autonomous Positioning and Path Planning for Mobile Robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 35, no. 1, p. 109. DOI: 10.1186/s10033-022-00775-4
3. 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

*nologii*, vol. 27, no. 4, pp. 171-179 (in Russ.). DOI: 10.17587/it.27.171-179

18. 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

19. 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

20. Kosheleva D.D., Doronina A.V. (2021) [Fourier transform and fast Fourier transform]. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie*, no. 38, pp. 626-632 (in Russ.).

21. Vashkevich M.I., Azarov I.S. (2020) [Comparison of time-frequency transforms: Fourier analysis, wavelets and phase-transform based filter banks]. *Cifrovaja obrabotka signalov*, no. 2, pp. 13-26 (in Russ.).

22. Mingazin A.T. (2024) Improved synthesis of FIR shaping filters for digital communication systems. *Cifrovaja obrabotka signalov*, no. 1, pp. 12-20 (in Russ.).

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

24. 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

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

26. Kaplun D., Voznesensky A., Romanov S. (2020) Classification of Hydroacoustic Signals Based on Har-

monic Wavelets and a Deep Learning Artificial Intelligence System. *Applied Sciences (Switzerland)*, no. 10, p. 3097.

27. Kaplun D., Voznesensky A., Bogaevsky D. (2019) [Overview and comparison of noise cleaning algorithms]. *Komponentyi tehnologii*, no. 1, pp. 114-119 (in Russ.).

28. Gadzikovsky V.I. (2006) [Two forms of representation of bandpass and recursive recursive digital filters of cascade structure]. *Cifrovaja obrabotka signalov*, no. 3, pp. 42-48 (in Russ.).

29. Altman E.A., Zakharenko E.I., Vaseeva T.V. (2017) [Application of the method of decomposition of two-dimensional convolution in the implementation of digital filters]. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 4, pp. 95-104 (in Russ.). DOI: 10.17212/1814-1196-2017-4-95-104

30. 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 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-4-15

31. 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 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-38-48

32. Ermakov P.G., Gogolev A.A. (2024) [Software complex of the algorithms for the autonomous determination of the angular orientation parameters of the unmanned aerial vehicles]. *Trudy MAI*, no. 124, p. 21 (in Russ.). DOI: 10.34759/trd-2022-124-17

### Study of Digital Discrete Fast High Order Bandpass Filter on TMS320F28377D Processor for Mobile Robot Navigation

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, Izhevsk Radio Plant, Izhevsk, Russia

*A digital discrete high-order fast bandpass filter on the TMS320F28377D processor for mobile robot navigation is developed and investigated. The application of the developed band-pass filter in beacon laser navigation systems is proposed in order to increase the speed of mobile robot coordinate computation when solving the fast convolution problem. A fast convolution algorithm based on a digital continuous band-pass Butterworth filter, which is optimal in terms of minimum computation time, is presented. The developed 22-order Butterworth filter is implemented on a digital signal processor TMS320F28377D using a double buffer with parallel recording and processing of data from ADC. The peculiarity of the bandpass filter implementation is its real-time operation for searching signals of navigation beacon lasers in a given frequency band. Two DMA direct memory access modules, CLA accelerator module of the TMS320F28377D processor are used to increase the speed of data processing. The correlation function calculated as a result of convolution of the original signal with the reference signal of a given frequency and filtered by a low-pass filter using the moving average method was obtained. The maximum of the calculated correlation function shows the time delay between the beginning of the beacon pulse transmission and the reception time at the photodiode. This delay time shows the azimuth to the beacon. Laser beacon system (LSM) for robot navigation has the following advantages compared to radio equipment: lower range measurement error, small size of optical systems compared to the size of radar antennas, and high angle resolution due to the narrow beam of sounding radiation. High noise immunity of LSM, including to deliberate interference, allows solving navigation tasks in conditions of suppression of global*

navigation systems (such as GPS and GLONASS), when the means of autonomous navigation cannot fully provide data to the robot control system. The convolution execution time on the TMS320F28377D processor is 1.8 ms.

**Keywords:** bandpass filter, TMS320F28377D processor, correlation function, signal convolution, beacon laser systems.

Получено 12.09.2024

#### Образец цитирования

Трефилов С. А., Никитин Ю. Р., Пономарев Д. А. Исследование цифрового дискретного быстродействующего 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

#### For Citation

Trefilov S.A., Nikitin Yu.R., Ponomarev D.A. (2024) [Study of Digital Discrete Fast High Order Bandpass Filter on TMS320F28377D Processor for Mobile Robot Navigation]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 55-69 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-55-69