

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА

УДК 621.865.8

*С.А. Голь, В.Е. Корнеев, Т.Н. Нгуен***ОПЦИОНАЛЬНО НАПОЛНЯЕМЫЙ, МАСШТАБИРУЕМЫЙ
КОМПЛЕКС УНИВЕРСАЛЬНЫХ СИЛОВЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ
И МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ**

Описан комплекс перспективных аппаратных средств для мобильной робототехники, структурно-функциональное наполнение которых формируется на основе требований к объектам управления – электроприводам исполнительных механизмов, характеристикам цепей обратной связи, структуре и составу бортовой ИИС проектируемой мехатронной системы.

Ключевые слова: электропривод, силовой контроллер, интерфейс, мобильный робот, бортовая ИИС.

Введение. Робототехника – это отрасль, которой отводится ключевая роль в большинстве экспертных прогнозов развития ведущих стран мира. Основной тенденцией современного динамичного прогрессирования этой области является не только количественный рост инновационных решений и инвестиций, но и их переориентация от сектора так называемой промышленной робототехники, к которой традиционно относят различные программируемые манипуляторы для сварки, сортировки и прочее, в сектор когнитивных роботов, возможности которых уже позволяют выйти за границы естественных для них рынков рекламы и развлечений.

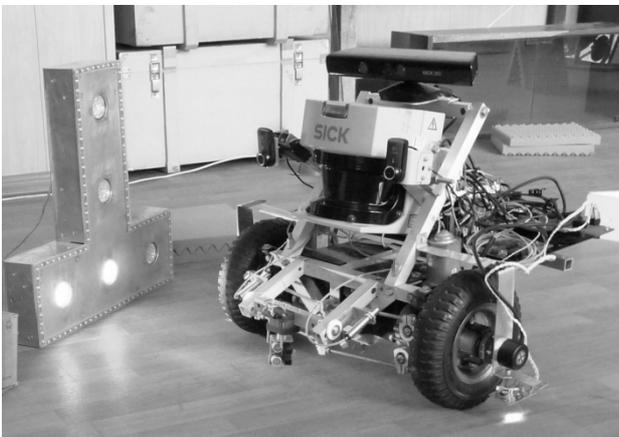


Рисунок 1 – Мобильный колесный робот «Аврора»

С появлением первых прототипов автомобилей-

роботов, роботов-андроидов, адаптированных к невозможным для пребывания человека условиям работы, мобильных роботов – домашних ассистентов, роботов для обеспечения безопасности, беспилотных летательных аппаратов, подводных роботов и т.д., эволюционирует и само понятие «робот». Его смысловое содержание в противовес сложившейся ассоциации с промышленными ЧПУ-станками во все большей степени соотносится с искусственным интеллектом, способным сравнимо с человеком анализировать поступающую информацию, делать на ее основе целеполагающие выводы и реализовывать стратегии поведения, а также принимать в реальном времени оптимальные решения в условиях крайней неопределенности сцен в слабоструктурированных средах.



Рисунок 2 – Мобильный робот с удаленным управлением через web-интерфейс

Развитие когнитивной робототехники требует одновременного совершенствования и инструментальной базы. Она должна в большей степени отвечать запросам разработчиков, касающихся масштабируемости, универсализма, гибкого модульного подхода к построению мехатронных систем с расширением набора конфигураций, поддерживаемых каждым модулем в отдельности.

В частности, опыт разработки СКБ РГРТУ мобильного колесного робота «Аврора» с развитой бортовой ИИС для исследования различных сценариев автономного управления в слабоструктурированных средах (рисунок 1), мобильного робота с удаленным управлением через web-интерфейс (рисунок 2), автомобиля-робота на базе транспортного средства «ГАЗель БИЗНЕС» (рисунок 3), открытой аппаратной платформы для тестирования стороннего и проприетарного программного обеспечения автопилота наземных транспортных средств (рисунок 4) и др. (см. сайт www.kb-avtoqa.ru), позволил выявить ряд эксплуатационных и структурных недостатков с точки зрения когнитивной робототехники в доступных сегодня на рынке системах сбора измерительных данных и силовых контроллеров управления исполнительными системами роботов, включающих в себя различные виды электродвигателей. Это послужило отправной точкой в движении к цели работы: созданию универсального мультисенсорного преобразователя и силового контроллера «Унимото» управления электродвигателями с обратной связью, а также сервиса для его опционального наполнения.



Рисунок 3 – Автомобиль-робот на базе «ГАЗель БИЗНЕС»



Рисунок 4 – Открытая отладочная робототехническая платформа

Универсальный силовой контроллер (УСК). Поскольку формальных методов оптимального определения структуры силового контроллера по заданным техническим характеристикам нет, ее определение было осуществлено «методом последовательных приближений», который предполагает пошаговый переход от разработки одной экспериментальной версии устройства к следующей с улучшенными свойствами, формируемыми на основе экспертного мнения разработчиков мехатронных систем, тестирующих текущую версию контроллера в составе различных робототехнических платформ. В настоящей статье представлено описание актуальной на момент публикации – четвертой версии универсального силового контроллера «Унимото» (рисунок 5).

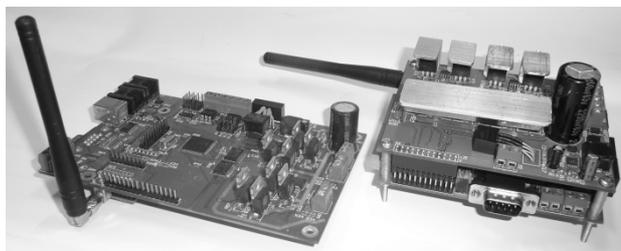


Рисунок 5 – УСК 3-й и 4-й версий

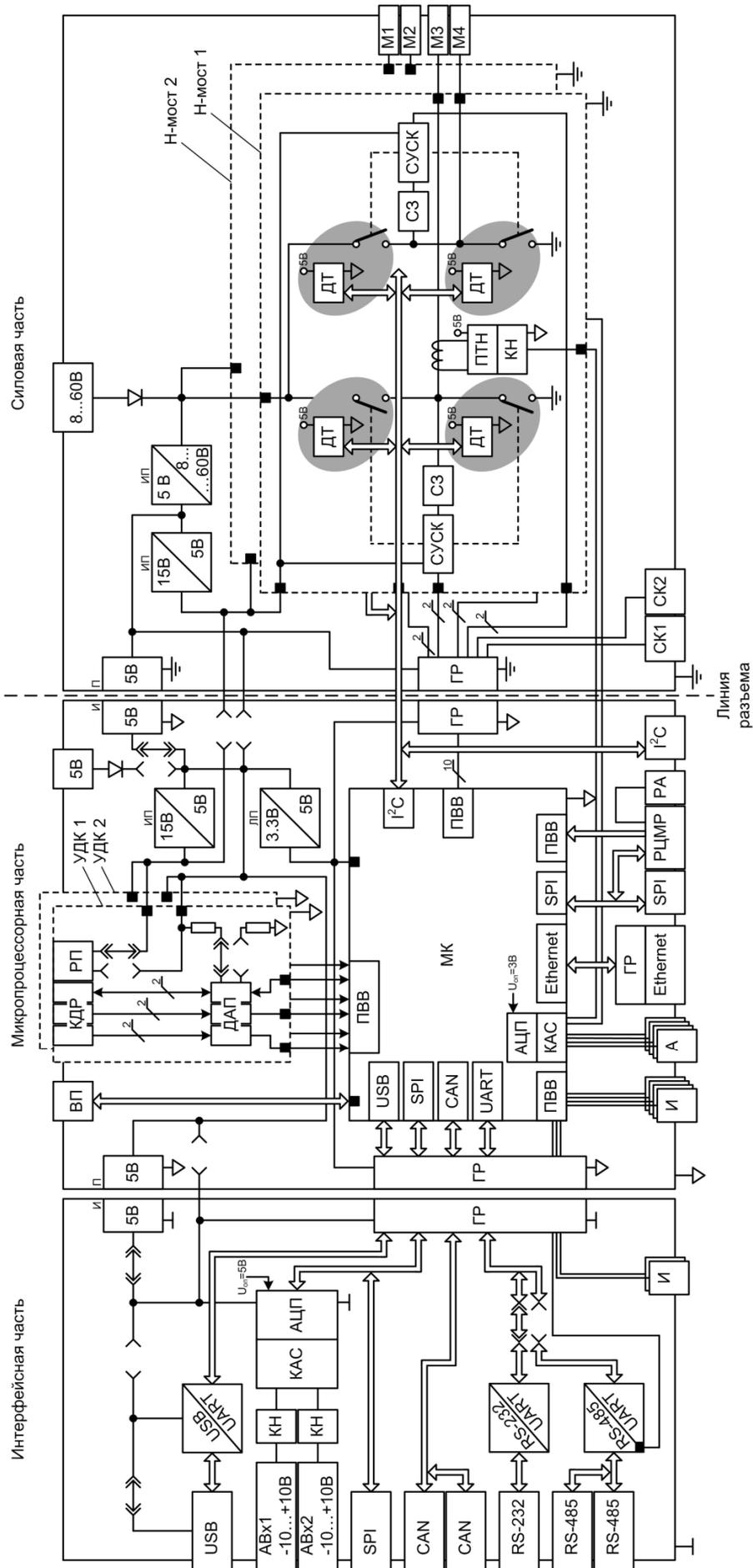


Рисунок 6 – Структура УСК

В самом общем представлении УСК предназначен для управления двумя коллекторными электродвигателями, или одним двухфазным шаговым электродвигателем, или одним трехфазным бесколлекторным электродвигателем по положению, по скорости или по крутящему моменту, что обеспечивается поддержкой различных видов сенсоров для организации обратной связи. УСК представляет собой опционально наполняемую систему исходя из требований конкретной области применения, что достигается путем установки различных комбинаций электронных компонентов на единые для всех вариантов исполнения печатные платы. Поэтому вначале будет целесообразно концептуально описать УСК с максимальным аппаратным наполнением, а затем перейти к возможным функциональным нюансам, вносимым теми или иными опциями.

УСК состоит из трех гальванически развязанных между собой частей: интерфейсной, микропроцессорной и силовой (рисунок 6). Это достигается путем использования гальванической развязки (ГР) линий цифровых сигналов, а также развязанных импульсных преобразователей (ИП) напряжения.

Силовая часть содержит в своем составе 4 силовых полумоста и выполнена на отдельной печатной плате, конструктивно устанавливаемой «вторым этажом» на плату интерфейсной и микропроцессорной частей с коммутацией линий питания и цифровых сигналов через специальный разъем. В случае управления двумя коллекторными или одним двухфазным шаговым электродвигателями силовые полумосты программно объединяются в два H-моста, а в случае управления трехфазным бесколлекторным электродвигателем для переключения соответствующих обмоток из четырех полумостов задействуются лишь три. Схема управления силовыми ключами (СУСК) каждого полумоста переводит их в открытое или закрытое состояние согласно ШИМ-сигналам, поступающим через ГР с портов ввода-вывода (ПВВ) микроконтроллера (МК). В зависимости от контролируемых схемами защиты (СЗ) потенциалов средних точек всех силовых полумостов и текущих значений управляющих ШИМ-сигналов эти схемы определяют наличие короткого замыкания нагрузки или пробоя на корпус и осуществляют приоритетное по отношению к МК отключение испытывающего эти проблемы полумоста. Кроме того, СУСК имеют защиту от падения напряжения управления силовыми ключами, что может быть причиной перехода последних из ключевого в линейный режим и выходу их из строя. Для подключения

электродвигателей к средним точкам силовых полумостов предназначены клеммы М1 – М4. Причем токи через М1 и М3 измеряются бесшунтовыми интегральными трансформаторами тока, которые далее переводятся преобразователями токов в напряжения (ПТН) и с помощью каналов нормализации (КН) приводятся к диапазону преобразования АЦП 0...3В МК, на который поступают через коммутатор аналоговых сигналов (КАС). Таким образом, решается две задачи: организация силомоментной обратной связи по току и защита от критических значений тока. Предпочтение в пользу бесшунтового решения этих задач было отдано ввиду значительной потери мощности на шунтах, неизбежного наличия у них распределенной индуктивности, искажающей результаты измерений на высоких частотах, а также меньшей помехозащищенности. К тому же токовые трансформаторы обеспечивают гальваническую развязку измерительных сигналов. При перегреве полумостов автоматически срабатывает термозащита, которая реализована на основе восьми соединенных с МК по интерфейсу I2C датчиков температуры (ДТ), каждый из которых приклеен на термопроводящий клей к соответствующему силовому ключу. Превышение температуры каким-либо силовым ключом установленного порогового значения приводит к отключению микроконтроллером полумоста, которому принадлежит этот ключ. Силовая часть УСК содержит в своем составе два твердотельных реле (управляются с помощью портов ввода-вывода МК через ГР), которые коммутируют подключаемые к разъемам сухих контактов СК1 и СК2 цепи. На силовую часть через разъем с защитой от переплюсовки поступает напряжение питания всего УСК в целом 8...60В, которое понижается импульсным преобразователем до 5В для питания ГР со стороны силовой части, а затем преобразуется в 15В для питания СУСК.

Микропроцессорная часть может быть запитана в зависимости от аппаратных настроек как от гальванически развязанного ИП 5В в напряжение 5В, так и от внешнего напряжения того же номинала, поступающего через отдельный разъем с защитой от переплюсовки. Необходимость в последнем может быть вызвана желанием исключить возможные просадки напряжения питания при больших пусковых токах некоторых электродвигателей, приводящие к сбоям или перезагрузкам МК. Микропроцессорная часть содержит входные разъемы импульсных (И) и аналоговых (А) сигналов, гальванически развязанный разъем интерфейса Ethernet, разъемы интерфейсов I²C (используются также датчиками

температуры ДТ) и SPI (доступен, если не используется модуль цифрового радиоканала), разъемы цифрового модуля радиоканала (РЦМР) и его антенны (РА), а также разъем внутрисхемного программатора (ВП). Особого внимания заслуживают два универсальных дифференциальных конвертора (УДК) микропроцессорной части.

Каждый УДК предназначен для одновременной работы с тремя дифференциальными линиями импульсных данных (подключаются через комбинированный дифференциальный разъем КДР): две из которых являются входными по отношению к УСК, а третья – может быть входной или выходной в зависимости от аппаратной настройки. Структура УДК определена из анализа характеристик большинства типов применяемых на практике энкодеров для организации обратной связи по скорости и углу поворота вала управляемого электродвигателя. УДК состоит из КДР, разъема питания (РП), дифференциально-абсолютного преобразователя (ДАП) и переключателей аппаратной настройки, которые определяют направление третьей дифференциальной линии и напряжение на разъеме питания 5 или 15 В (номиналы актуальны для большинства современных энкодеров). Такая структура позволяет подключить к УСК абсолютные энкодеры по SSI-интерфейсу, относительные энкодеры с парафазными дифференциальными сигналами и одним калибровочным. Помимо энкодеров УДК поддерживает физический уровень интерфейса RS-422, что актуально для применений требующих полнодуплексного помехозащищенного обмена данными. Наконец, УДК может служить приемником дифференциального синхросигнала в системе с несколькими УСК, критичной ко времени запуска на выполнение асинхронно поступивших команд управления электродвигателями распределенных исполнительных подсистем.

Интерфейсная часть может быть запрошена в зависимости от аппаратных настроек как от гальванически развязанного ИП 5В в напряжение 5В, так и от напряжения, приходящего на USB разъем. Наряду с аппаратными настройками, осуществляемыми с помощью небольшого количества переключателей, УСК имеет программные настройки, устанавливаемые специальной утилитой только через основной интерфейс устройства – USB. Интерфейсная часть поддерживает широкий набор интерфейсов обмена данными через одиночные разъемы USB, RS-232/UART, SPI, а также через сдвоенные запараллеленные разъемы CAN и RS-485, что позволяет транслировать эти линии другим адресатам. Помимо

этого, интерфейсная часть УСК позволяет управлять электродвигателями с помощью стандартных аналоговых сигналов $-10...+10В$, поступающих на аналоговые входы АВх 1 и 2, а также двумя ШИМ-сигналами, поступающими на импульсные (гальванически развязанные) входы И.

Исходной предпосылкой для создания и дальнейшего итерационного совершенствования функционального наполнения УСК являлся поиск его структуры, которая удовлетворяла бы объединению множеств требований к аппаратным средствам, имеющим место в большинстве различных робототехнических задач. Однако перегруженность инструментами «на все случаи жизни» сама по себе является недостатком, хотя бы потому, что заведомо снижает надежность проектируемой системы. Поэтому для оптимизации структуры УСК разработана специальная сервисная программа, позволяющая разработчику выбрать необходимые опции, модифицирующие аппаратное наполнение каждого конкретного экземпляра согласно характеристикам проектируемой целевой мехатронной системы. Программа автоматически формирует набор компонентов, которые требуется установить на печатные платы УСК для реализации заложенных функций, и модифицирует программное обеспечение микроконтроллера.

Опции, присутствующие в любой комплектации:

- напряжение 8 – 60В,
- возможность отдельного питания для микропроцессорной части,
- защита от падения напряжения управления силовыми ключами,
- защита от переплюсовки питания,
- основной интерфейс USB,
- возможность подключения четырех концевых датчиков.

Опции по выбору.

1. Поддерживаемые электродвигатели:

- двухфазный шаговый электродвигатель,
- трехфазный бесколлекторный электродвигатель,
- коллекторный электродвигатель,
- дополнительный коллекторный электродвигатель,
- 4 стандартных рулевых сервопривода.

2. Гальваническая развязка интерфейсной, микропроцессорной и силовой частей:

- без развязки,
- силовая часть отвязана от микропроцессорной и интерфейсной частей,
- итерфейсная, микропроцессорная и сило-

вая части развязаны между собой.

3. Интерфейсы:

– аналоговое управление $-10\dots+10\text{В}$ (2 входа),

– RS-485 (сдвоенный разъем),

– RS-232/UART,

– SPI,

– I2C

– CAN,

– Ethernet (с гальванической развязкой).

4. Обратная связь (по углу поворота вала и скорости его вращения):

– 2 относительных энкодера с дифференциальным подключением или 2 относительных энкодера с абсолютными сигналами или 2 абсолютных энкодера с SSI-интерфейсом),

– 2 потенциометра,

– 2 резольвера,

– 4 датчика Холла,

– 2 видеоэнкодера.

5. Дополнительная силомоментная обратная связь:

– интегральный датчик тока,

– дополнительный интегральный датчик тока.

6. Динамический тормоз:

– есть;

– нет.

7. Обеспечиваемый ток нагрузки:

– до 15 А,

– до 30 А.

8. Термозащита:

– 2 датчика температуры,

– 4 датчика температуры,

– 8 датчиков температуры.

9. Программируемая звуковая и светодиодная сигнализация снижения питания (контроль заряда аккумулятора)

– есть,

– нет.

10. Твердотельные реле:

– без сухих контактов,

– 1 сухой контакт,

– 2 сухих контакта.

11. Глобальный синхросигнал:

– без возможности синхронизации,

– дифференциальный сигнал синхронизации.

Универсальный мультисенсорный преобразователь. Когнитивных роботов отличает, во-первых, применение сложных нелинейных алгоритмов управления, базирующихся на генетических моделях, спайковых нейронных сетях [1], нечеткой логике, байесовском обучении и дру-

гих разделах математического аппарата искусственного интеллекта. Во-вторых, использование избыточных потоков измерительной информации, интегрирующих данные от множества разнородных, основанных на различных физических принципах сенсоров, таких как одометры, акселерометры, гироскопы, датчики магнитной индукции, ультразвуковые сонары, инфракрасные дальнометры, датчики азимута и расстояния до активных и пассивных маяков и др., многие из которых требуется еще и периодически вращать или качать для получения развертки измерительного сигнала или перемещения диаграммы направленности. Они, как правило, имеют различные требования к электропитанию и передают измерительные данные по несовместимым интерфейсам, что приводит к перегруженности конечной системы различного рода преобразователями напряжений питания, согласующими устройствами, модулями управления маломощными электромеханическими устройствами вращения или качания, а также большим количеством соединительных проводов. Универсальный мультисенсорный преобразователь (УМСП) предназначен для решения обозначенных проблем за счет сосредоточения необходимого инструментария на одной печатной плате (рисунок 7).

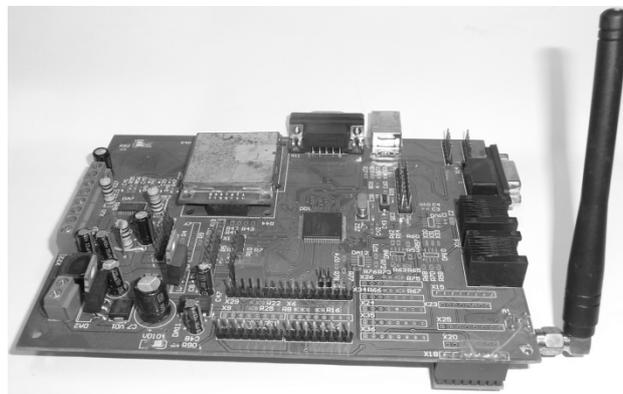


Рисунок 7 – Плата УМСП

УМСП питается от напряжения 12В и преобразует его в ряд наиболее востребованных поддерживаемыми устройствами напряжений 3,3В, 5В, -5В, 24В, которые выведены на периферийные разъемы питания (рисунок 8). Состав интерфейсов для обмена цифровыми данными схож с УСК: USB, RS-485, RS-422, RS-232/UART, SPI, CAN, Ethernet (с гальванической развязкой). Отдельные разъемы предназначены для подключения модуля цифрового радиоканала и его антенны, ГЛОНАСС/GPS-приемника, графического или знаковосинтезирующего индикатора РИ, внутрисхемного программатора.

Клеммы M1.1 – M1.4 и M2.1, M2.2 предназначены для подключения к схемам управления СУ маломощных шагового двухфазного (ШЭД) и коллекторного КЭД электродвигателей соответственно. Причем для ШЭД предусмотрена аппаратная настройка дробления шага с помощью переключек, задающих необходимый коэффициент деления. УМСП содержит 8 блоков аналогового ввода данных АВ1 – 8, каждый из которых предназначен для работы как с абсолютными, так и с дифференциальными сигналами и осуще-

ствляет их простейшую аналоговую преобработку: усиление, ослабление, смещение или фильтрацию, в зависимости от заданного режима работы операционного усилителя с помощью устанавливаемых пользователем на предусмотренные посадочные места чип-конденсаторов и чип-резисторов. В состав УМСП входят также 5 импульсных блоков ввода-вывода ИВВ1 – 5 с аппаратно настраиваемыми коэффициентами деления, а также «подтяжками» к напряжению питания или «земле».

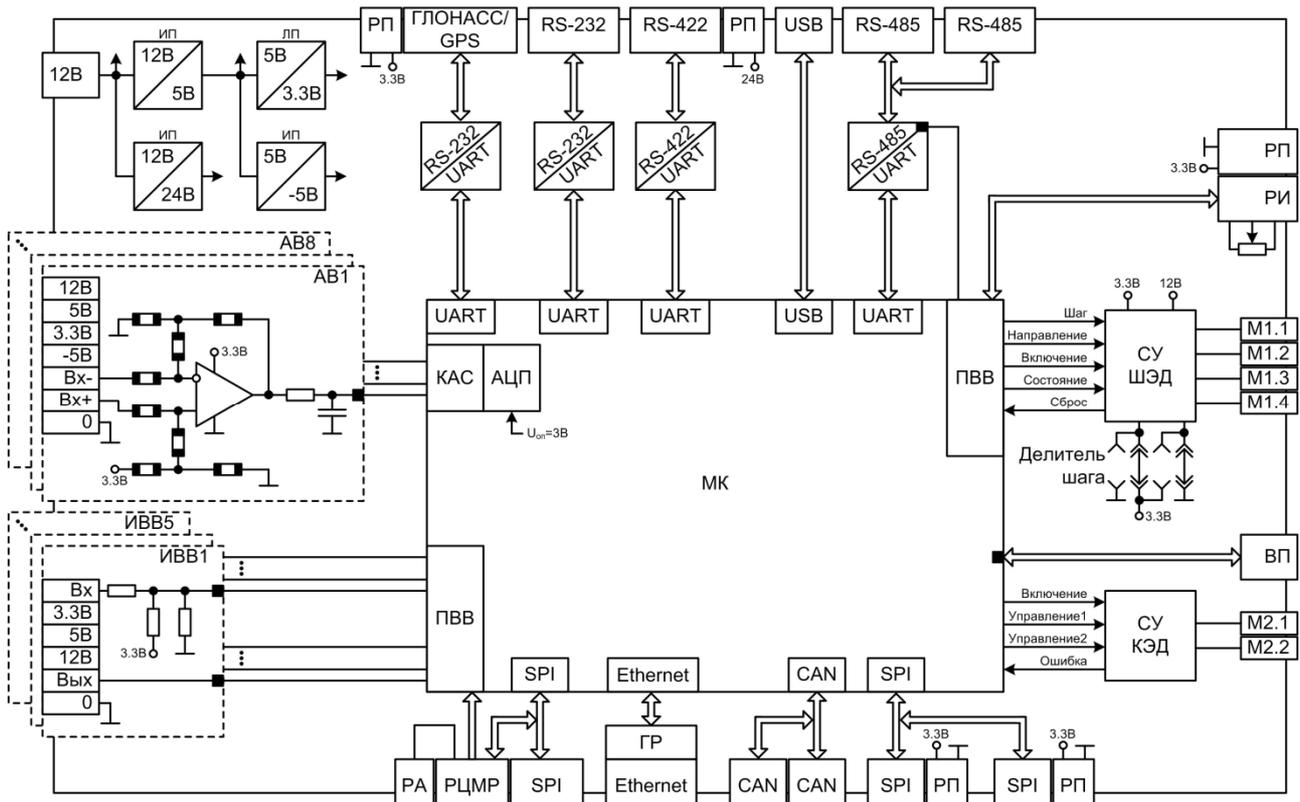


Рисунок 8 – Структура УМСП

Заключение. Важными преимуществами описанного комплекса универсальных силовых контроллеров и мультисенсорных преобразователей являются высокая степень применимости для широкого круга задач робототехники (универсализм), масштабируемость и опциональное наполнение, что, в конечном счете, положительно сказывается на стоимости, надежности, компактности и других показателях эффективности разрабатываемых на его основе систем. Комплекс представляет собой развитый инструмен-

тарий поддержки разработки мобильных робототехнических платформ на всех стадиях их развития: от экспериментального поиска лучшего решения до применения в серийно выпускаемых образцах.

Bouganis A .and Shanahan. M. Training a spiking neural network to control a 4-DoF robotic arm based on spike timing-dependent plasticity. Proc. IEEE Int. Joint Conf. Neural Netw., 2010, p. 4104 – 4111.

УДК 629.113

С.А. Голь, Т.Н. Нгуен, А.А. Погудяев

АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПИЛОТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЕМ С МЕХАНИЧЕСКОЙ КОРОБКЕЙ ПЕРЕДАЧ

Рассматривается структура аппаратной части системы автопилота автомобиля на базе «ГАЗель БИЗНЕС» в составе электромеханической подсистемы, бортовой ИИС, силовой подсистемы, подсистемы электропитания, вычислительной подсистемы и подсистемы безопасности.

Ключевые слова: автомобиль-робот, электропривод, силовой контроллер, интерфейс, автопилот, бортовая ИИС.

Введение. Группа ГАЗ является лидером рынка коммерческого транспорта России, в частности занимая около 52 % сегмента легких коммерческих автомобилей [1]. Столь впечатляющий результат в жесткой конкурентной борьбе с зарубежными производителями был бы невозможен без постоянного совершенствования выпускаемой продукции, своевременно удовлетворяющего растущим запросам потребителей к приспособленности к интенсивной эксплуатации в сложных дорожных условиях, надежности коммерческих автомобилей, расходу топлива, ремонтпригодности в полевых условиях и пр. Опытные образцы разрабатываемых автомобилей нового поколения, равно как и контрольные экземпляры серийного выпускаемых транспортных средств, непрерывно подвергаются жестким испытаниям на тестовом полигоне «Березовая пойма» для выявления путей оптимизации их конструкции.



Рисунок 1 – Тестовый трек с булыжным профилем

В частности, надежность трансмиссии на износ проверяется на специальной кольцевой

булыжной трассе профилированного мощения (рисунок 1), по которой автомобиль должен проехать не менее 12000 км со средней скоростью 60 км/ч без критических повреждений. Работа бригады испытателей – тяжелый, монотонный труд, связанный с опасным для здоровья уровнем вибраций и тряски. Поэтому группа ГАЗ поставила для себя цель внедрить в ближайшее время автономную систему управления транспортным средством, встраиваемую без вмешательства в конструктив тестируемого автомобиля для беспилотных циклических заездов на испытательном полигоне. С целью получения лучшего решения холдинг выступает основным инициатором ежегодных испытаний автомобилей-роботов «Робокросс», где в полевых условиях с жестким регламентом соревнуются команды разработчиков автономных систем управления наземными транспортными средствами. В 2013 году победителем испытаний стала команда СКБ РГРТУ.



Рисунок 2 – Автомобиль-робот на базе «ГАЗель БИЗНЕС»

Целью работы является описание аппаратной структуры беспилотной системы управления автомобилем-роботом «ГАЗель БИЗНЕС» (рисунок 2), которое охватывает следующие подсистемы:

темы: электромеханическую подсистему, проприоцептивную и экстроцептивную сенсорные подсистемы, силовую подсистему, подсистему электропитания, вычислительную подсистему.

Обзор российских разработок. Нарастающий поток информации о беспилотных транспортных средствах в СМИ сообщает в основном об успехах в этой области таких стран, как США, Япония, Германия и др. Информация же о российских разработках достаточно скудна. Поэтому приведем значимые в отдельных областях применения отечественные разработки автоном-

ных транспортных средств.

На рисунке 3, а представлен первый опытный образец беспилотного карьерного самосвала БелАЗ-75131 грузоподъемностью 130т с автопилотом от компании «ВИСТ Групп» (г. Москва). Машина предназначена для роботизации горного производства – добычи полезных ископаемых на открытой местности. Система позволит повысить производительность и безопасность работ в труднодоступных и тяжелых климатических условиях. На рисунке 3, б представлен пульт удаленного управления самосвалом.



а



б

Рисунок 3 – Автоматизация горного дела:

а – беспилотный самосвал;

б – пульт дистанционного управления

На рисунке 4, а приведен макетный образец беспилотного транспортного средства (разработка ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва) на базе автомобиля «Лада-Калина», с 7-ми ступенчатой автоматической коробкой передач без гидро-

трансформатора российской компании «КАТЕ». Автомобиль оснащен развитой системой технического зрения. На рисунке 4, б представлен механический узел автоматизации нажатия педали сцепления/тормоза.



а



б

Рисунок 4 – Автоматизация транспорта общего назначения:

а – автомобиль-робот на базе «Лада-Калина»;

б – автоматический узел педали сцепления/тормоза

Рисунок 5 демонстрирует мобильный роботизированный комплекс пожаротушения на базе гусеничного МТЛБ-у (а), разработанный в ФГБУ

ВНИИПО МЧС России, и узел автоматизации его механической коробки передач (б).



а
Рисунок 5 – Автоматизация пожаротушения:
 а - роботизированный комплекс пожаротушения на базе МЛТБ-у;
 б – автоматический узел переключения передач

Аппаратная часть автопилота. Современный уровень развития технологий, применяемых при производстве автоматических коробок передач, пока не позволяет конкурировать на рынке коммерческих грузовых автомобилей с традиционной механической коробкой с ручным переключением передач по критериям надежности, расхода топлива и ремонтпригодности в полевых условиях.

В силу отсутствия значимого сегодня и в прогнозе на ближайшие 10 лет спроса на коммерческие автомобили с автоматической коробкой передач группа ГАЗ применяет даже на своей флагманской линейке транспортных средств этого класса «ГАЗель NEXT» «ручную» коробку передач. А это, в свою очередь, усложняет аппаратно-программное наполнение системы автопилота за счет необходимости в более сложных электромеханических устройствах автоматизации переключения передач, тормоза и сцепления вала двигателя внутреннего сгорания с трансмиссией автомобиля.

Переключение передач (рисунок б) осуществляется двумя коллекторными электродвигателями (КЭД) с двумя планетарными редукторами, на концы выходных валов которых надеты и жестко зафиксированы торцевыми болтами цилиндрические муфты. К каждой муфте перпендикулярно к оси ее вращения приварен рычаг, на конец которого установлена двузубая вилка. Оба зубца вилки параллельны валу электродвигателя и при его свободном вращении описывают окружность. Радиус окружности регулируется путем изменения положения вилки на рычаге при ослаблении и фиксации соответствующего болтового соединения. Оба идентичных электромеханических узла «Передача Х» и «Передача Y» ортогонально закреплены на пластинах, парал-

лельных плоскости пола кабины транспортного средства, и юстированы таким образом, что ручка переключения передач в нейтральном положении находится между зубцов каждой вилки на уровне середины их длины. Т.е. зубцы отдельных вилок образуют охватывающий ручку механической коробки передач квадрат, который с помощью электромеханического узла «Передача Х» перемещается по поверхности мнимой сферы, увлекая за собой ручку влево или вправо, а с помощью электромеханического узла «Передача Y» – вперед или назад. Положение ручки определяется по данным магнитных абсолютных полуоборотных энкодеров (МАЭ), которые измеряют углы поворота валов обоих электромеханических узлов. Разработанная конструкция устройства автоматического переключения передач не ограничивает возможности их штатного, т.е. ручного, переключения.

Электромеханическое устройство автоматического управления сцеплением (рисунок 7) состоит из КЭД с планетарным редуктором. Вал на выходе редуктора передает вращающий момент через компенсирующую несоосность муфту вала с резьбой, оба конца которого вставлены в шариковые подшипники, жестко закрепленные в корпусе устройства. Угол поворота вала и скорость его вращения определяются по оптическому инкрементному энкодеру (ОИЭ). На вал накручена специальная гайка с ушками, преобразующая вращательное движение в поступательное. В ушки вставлена вилка рычага, вращающегося вокруг жестко закрепленной в корпусе устройства оси. Достижение гайкой крайних положений фиксируется концевыми датчиками Холла (ДХ). К другому концу рычага подсоединена легко скидываемая направляющая со встроенным датчиком силы (ДС), передающая поступа-

тельное движение педали сцепления. Простота отсоединения направляющей от педали сцепления позволяет быстро перейти от автономного режима управления к штатному.

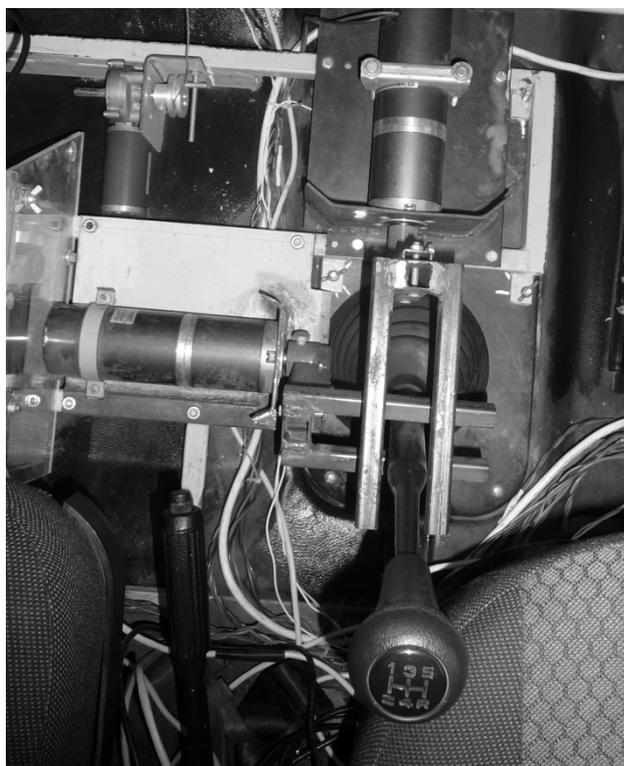


Рисунок 6 – Устройство переключения передач

Управление торможением автомобиля осуществляется устройством, полностью идентичным описанному для управления сцеплением.

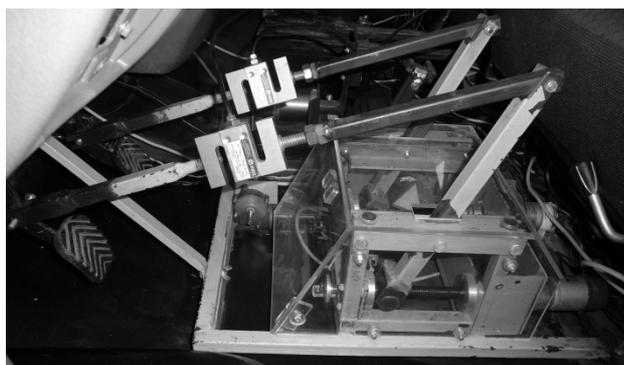


Рисунок 7 – Устройство управления сцеплением, тормозом и акселератором

Автоматическое управление акселерацией осуществляется с помощью стального троса, один конец которого соединен со штатным механизмом регулирования степени открытия дроссельной заслонки, а другой конец наматывается на диск с канавкой, установленный соосно на валу КЭД с червячным редуктором. Вращение диска приводит к натяжению или ослаблению троса, что, в свою очередь, позволяет регулировать количество горючей смеси, поступающей

в цилиндры двигателя внутреннего сгорания. При этом сохраняется возможность штатного управления педалью акселератора.

Поворот передних колес осуществляет КЭД с планетарным редуктором (рисунок 8). Он установлен на штатных болтах крепления гидросилителя руля и выровнен таким образом, что вал его редуктора параллелен нижнему колену карданного вала руля. На это колено и на конец вала редуктора надеты и зафиксированы в одной плоскости шестеренки, с помощью которых организована цепная передача вращающего момента. Углы поворота колес измеряются согласно модели Аккермана многооборотным оптическим абсолютным энкодером (ОАЭ). УСК1, как ведущее устройство системы управления нижнего уровня, получает команды от системы верхнего уровня – бортового компьютера (БК) по интерфейсу USB, а также от внешней системы управления – по радиоканалу, поддерживаемому с помощью цифрового модуля (ЦМР) по интерфейсу SPI. Помимо этого, УСК1 получает информацию о состоянии всех систем автомобиля «ГАЗель БИЗНЕС» от штатного блока управления (ШБУ) через преобразователь интерфейсов K-Line в RS-232.



Рисунок 8 – Устройство управления рулем

Нижний уровень автономной системы управления (рисунок 9) строится на базе трех плат универсальных силовых контроллеров «Унимото» УСК1, 2, 3 и одного универсального

мультисенсорного преобразователя (УМСП), разработанных в СКБ РГРТУ. Платы осуществляют обмен данными по интерфейсу RS-485 со скоростью 460800 бодов и соединены между собой по топологии «звезда» с ведущим устройством УСК1.



Рисунок 9 – Система управления нижнего уровня

Структура беспилотной системы автомобиля-робота «ГАЗель БИЗНЕС» представлена на рисунке 10. На базе УСК1 реализовано управление электроприводом сцепления и тормоза. КЭД соответствующих электромеханических устройств подключены через пары клемм М1, М2 и М3, М4. На импульсные входы И и комбинированные дифференциальные разъемы КДР УСК1 поступает измерительная информация от концевых датчиков Холла и оптических инкрементных энкодеров, которые передают свои данные по помехозащищенным дифференциальным линиям. ДХ и ОИЭ запитаны от гальванически развязанного преобразователя напряжения, понижающего основное бортовое напряжение питания с 12...13,8В до 5В. Измерительная информация о силе нажатия на педали сцепления и тормоза, а также текущее значение частоты оборотов вала двигателя внутреннего сгорания и средней скорости вращения ведущих (задних) колес поступает в УСК1 из УМСП по интерфейсу RS-485.

УМСП питает S-образные датчики силы с дифференциальным выходом стабилизирован-

ном напряжением 12В и осуществляет аналого-цифровое преобразование их измерительных сигналов, представляющих собой разностное напряжение между парами входов «Вх+» «Вх-» соответственно. Импульсные входы УМСП соединены со штатным датчиком частоты оборотов (ШДО) двигателя внутреннего сгорания и штатным датчиком средней скорости вращения ведущих колес (ШДС) автомобиля «ГАЗель БИЗНЕС». В составе УМСП задействованы источники напряжения 24В и 5В для питания лазерного сканера с круговой диаграммой направленности (КЛС) и роутера соответственно.

УСК2 осуществляет управление электроприводом автоматического устройства переключения передач, а также подачей звуковой (ЗС) и световой (СС) сигнализации, цепи которых коммутируются твердотельными реле через разъемы сухих контактов СК1 и СК2. КЭД, приводящие в движение ручку механической коробки передач влево-вправо и вперед-назад, подключены через пары клемм М1, М2 и М3, М4 соответственно. На аналоговые входы А поступает измерительная информация от МАЭ, определяющая текущее передаточное число трансмиссии автомобиля. МАЭ запитаны от гальванически развязанного преобразователя напряжения, понижающего основное бортовое напряжение питания с 12...13,8В до 5В.

На базе УСК3 организовано автоматическое управление электроприводом руля и акселератора, а также реле коммутации цепей зажигания и стартера через разъемы сухих контактов СК1 и СК2. КЭД соответствующих электромеханических устройств подключены через пары клемм М1, М2 и М3, М4. На КДР УСК3 поступает измерительная информация о текущих углах поворота передних колес согласно модели Аккермана и средней скорости вращения ведущей пары колес от многооборотного оптического абсолютного (ОАЭ) и оптического инкрементного энкодеров соответственно. ОИЭ установлен таким образом, что измеряет частоту вращения карданного вала трансмиссии. КДР ОАЭ переведен из обычного импульсного режима в режим SSI-интерфейса. В отличие от ШДО, данные от которого используются для управления сцеплением, ОИЭ является более быстродействующим и предназначен для повышения точности и надежности оценок при решении задач локализации и навигации роботизированного транспортного средства. ОАЭ и ОИЭ запитаны от гальванически развязанных преобразователей напряжения, конвертирующих основное бортовое напряжение питания 12...13,8В в 15В и 5В соответственно.

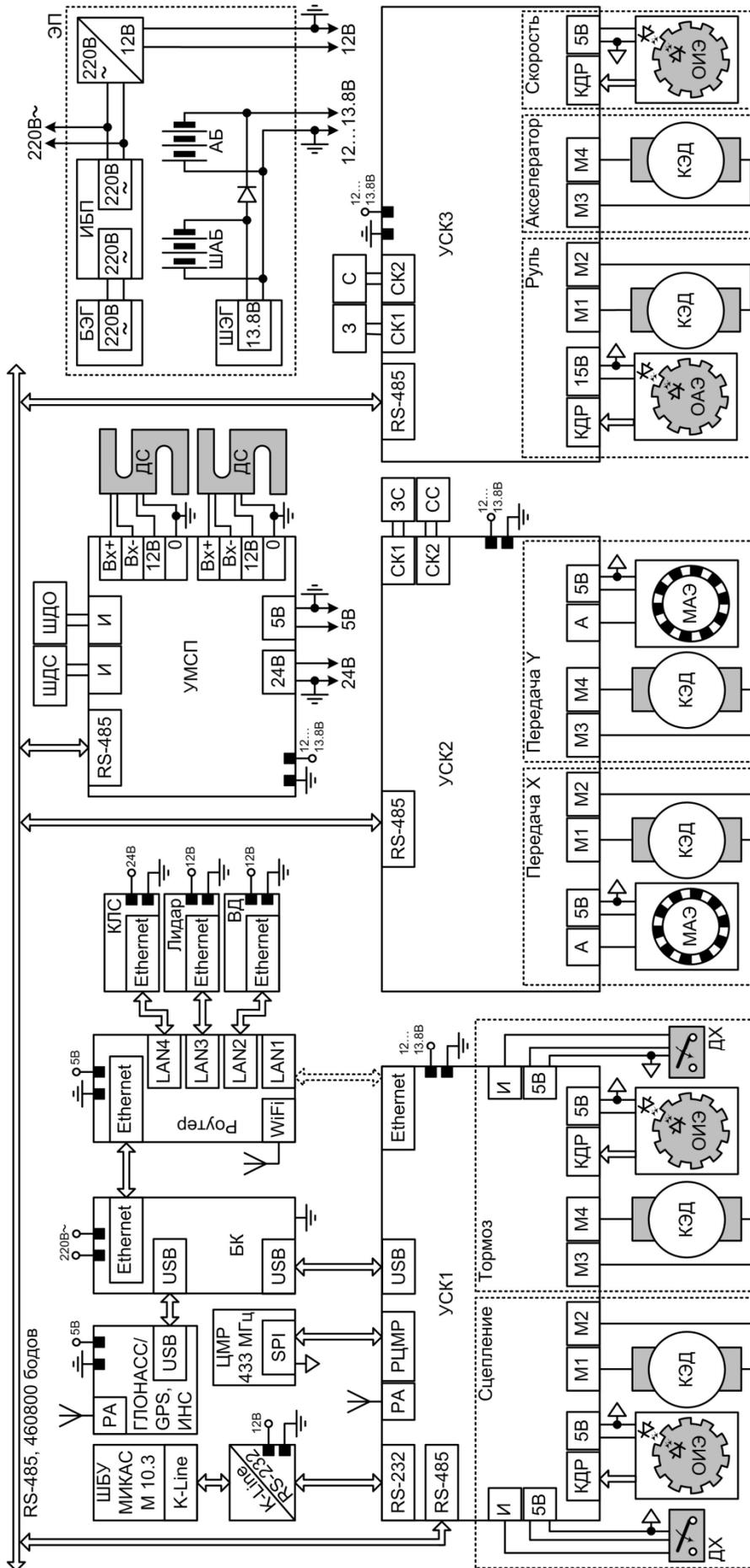


Рисунок 10 – Структура автономной системы управления

Все ОИЭ, МАЭ, ДХ, ДС, ОАЭ образуют проприоцептивную сенсорную систему. В состав экстроцептивной сенсорной системы входят лидар, лазерный сканер с круговой диаграммой направленности, видеодатчик и ГЛОНАСС/GPS-модуль, который конструктивно исполнен в объединении с инерциальной навигационной системой ИНС, строго говоря, не входящей ни в одну из упомянутых сенсорных систем.

Система электропитания ЭП формирует напряжение питания автономной системы управления трех номиналов: 220В переменного тока, 12В и 12...13.8В постоянного тока. Напряжение первого номинала поступает в систему автопилота с выхода источника бесперебойного питания (ИБП), вход которого соединен с выходом бензоэлектрогенератора (БЭГ). Напряжение второго номинала преобразуется из выходного напряжения ИБП. Напряжение третьего номинала формируется штатным электрогенератором (ШЭГ) и штатной аккумуляторной батареей (ШАБ), которые запараллелены с еще одной дополнительной аккумуляторной батареей (АБ). При заведенном двигателе внутреннего сгорания ШЭГ генерирует напряжение 13,8В постоянного тока, которое заряжает аккумуляторные батареи и питает систему управления нижнего уровня. При увеличении потребления напряжения на выходе ШЭГ может «просесть», но не ниже значения напряжения аккумуляторных батарей, которые в этом случае должны обеспечить системе автопилота недостающую энергию.

Бортовой компьютер осуществляет обработку измерительной информации экстроцептивной сенсорной системы и формирует команды управления для системы нижнего уровня по интерфейсу USB или резервному Ethernet-каналу.

Испытания автономных систем управления транспортными средствами могут привести к серьезному ущербу, в том числе к травмам людей, если тестирование пошло не по сценарию. По этой причине особого внимания заслуживает подсистема безопасности, которая предусматривает специальные средства немедленного останова автомобиля-робота при нештатных ситуациях. К ним относятся легкодоступные кнопки по периметру борта автомобиля, нажатие на которые приводит к разрыву цепи зажигания. Благодаря конструкции электромеханических приводов автономной системы, которая оставляет возможность штатного управления автомобилем, оператор может в любой момент времени перехватить на себя управление транспортным средством непосредственно с места водителя или опосредованно с помощью любого из дублирующих независимых пультов, работающих на частотах 433МГц и 2,4ГГц (WiFi). В случае потери связи с этими пультами автомобиль-робот немедленно прекращает движение. Помимо этого, движение транспортного средства сопровождается световой и звуковой сигнализацией.

Заключение. Разработанная система беспилотного управления автомобилем «ГАЗель БИЗ-НЕС» успешно прошла испытания на тестовом полигоне завода «ГАЗ». Тестовые сценарии включали в себя движение по заданной траектории с огибанием препятствий, следование за подвижной целью, маневрирование задним ходом, начало движения в уклон.

Группа ГАЗ [Electronic resource] // Официальный сайт «Группы ГАЗ» [Official website]. URL: <http://www.gaz.ru> (accessed: 07.11.2013).

УДК 004.896:621.865.8

В.И. Жулев, В.С. Леушкин, Т.Н. Нгуен

ПЛАНИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ АВТОМОБИЛЯ-РОБОТА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Рассматриваются недостатки алгоритмов планирования траектории и поиска пути в дискретном пространстве состояний для задачи управления автономным транспортным средством. Предложен алгоритм планирования траектории автомобиля-робота в реальном времени, учитывающий указанные недостатки. Рассмотрены особенности реализации и результаты практического применения предложенного алгоритма.

Ключевые слова: планирование траектории в реальном времени, автомобиль-робот, автономное управление.

Введение. Для принятия участия в соревнованиях РобоКросс командой СКБ РГРТУ создан автомобиль-робот «ГАЗель» (рисунок 1).



Рисунок 1 – Автомобиль-робот «ГАЗель»

Задание сезона 2013 года («Мул») подразумевает собой полностью автономное выполнение задачи: робот должен проследовать за человеком в зону разворота и осуществить возвращение в точку старта. При этом на обратном пути возможно появление препятствий либо их смещение. Таким образом, робот должен иметь возможность реагировать на изменение дорожной обстановки в реальном времени.

Программное обеспечение, осуществляющее обработку сенсорных данных и принятие управляющего решения, является многоуровневым. Это позволяет разделить задачи на узкоспециализированные, что упрощает отладку и коллективную разработку программы. Частная схема взаимодействия программных модулей планирования траектории и траекторного управления представлена на рисунке 2.

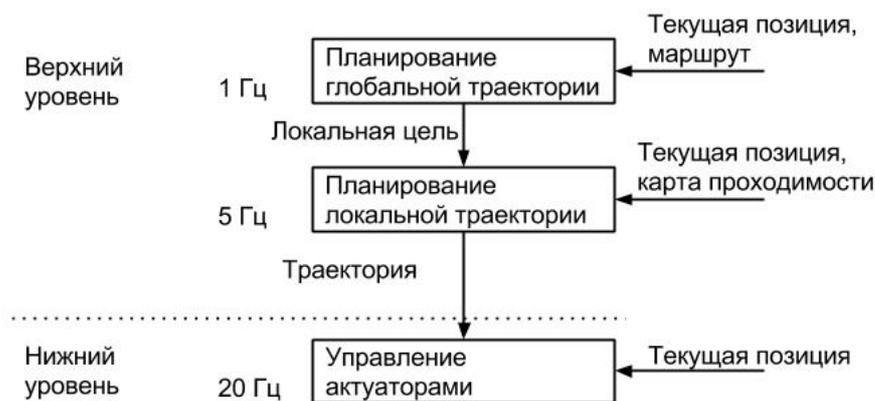


Рисунок 2 – Схема взаимодействия программных модулей планирования траектории и траекторного управления

Планирование глобальной траектории (рисунок 3,а) представляет собой процесс выбора контрольных точек маршрута без учёта конкретной дорожной обстановки. Список контрольных точек может быть известен заранее (на основе лога GPS координат, как в задании «Мул») либо построен на основе векторной карты дорожной сети. Этот процесс похож на работу штурмана, который по карте определяет, где нужно повернуть или сделать остановку, и сообщает это водителю.

Планирование локальной траектории – получение траектории, которая учитывает расположение дороги и препятствий, а также кинематические и динамические ограничения автомобиля и положение ключевых точек маршрута

(рисунок 3,б) осуществляется в ограниченном радиусе вокруг автомобиля, что определяется максимальной дальностью, обеспечиваемой дальномерами.

На основе полученной траектории ПО нижнего уровня осуществляет управление скоростью и положением руля автомобиля.

Таким образом, планирование локальной траектории направлено на избежание столкновения с препятствиями и выхода автомобиля из определённого дорожного коридора движения.

Целью данной работы является модификация алгоритма планирования локальной траектории CL-RRT автомобиля-робота в реальном времени.

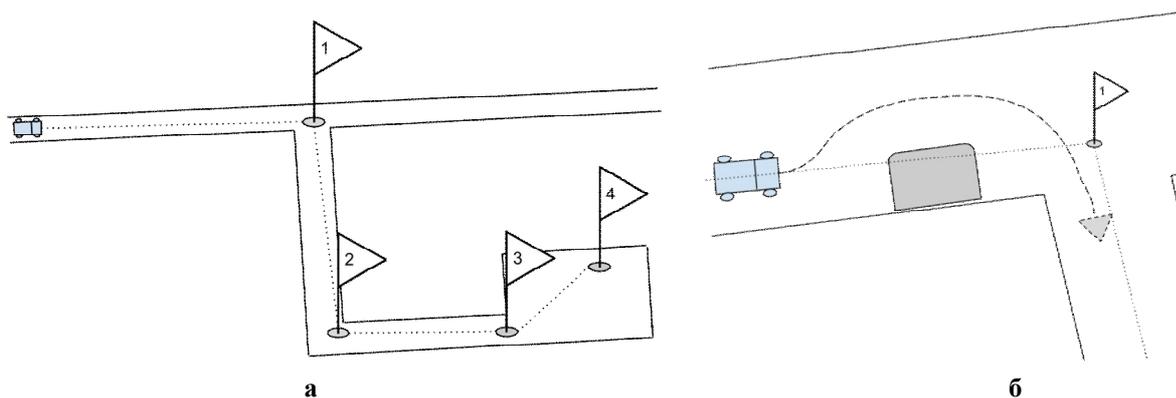


Рисунок 3 – Маршрут и траектория транспортного средства:

а – маршрут следования автомобиля;

б – локальная (пунктир) и промежуточная траектории

Описание проблемы. Существующие методы планирования кратчайшего пути, такие как A^* («А звезда» или «A star» [1]), разработаны для дискретного пространства состояний робота, а также не учитывают кинематических ограничений системы – автомобиль, к примеру, не может двигаться боком либо изменять скорость и направление движения мгновенно.

Dolgov и Thrun [2] был представлен модифицированный алгоритм Hybrid- A^* , который распространён на непрерывное пространство состояний, и позволяет применять его для планирования траектории автомобиля. Однако данный алгоритм генерирует траекторию, не пригодную для исполнения без дополнительного сглаживания и оптимизации.

Процесс поиска кратчайшего пути в непрерывном пространстве состояний, в общем случае, представляет собой неразрешимую задачу, так как перебор всех состояний невозможен. Поэтому были разработаны методы, позволяющие получить траекторию близкую к оптимальной. Эти методы основаны, как правило, на случайном поиске. Известным представителем данной группы методов является RRT – Rapidly exploring Random Tree – быстро разворачивающееся случайное дерево [3].

Однако применение RRT для управления автомобилем напрямую также невозможно, ввиду того что этот метод не учитывает кинематические ограничения робота-автомобиля.

Kuwata и др. [4] представлена модификация метода RRT – CL-RRT, позволяющая учитывать указанные выше ограничения. Данный алгоритм с успехом применялся на соревнованиях *Darpa Urban Challenge*. Идея алгоритма CL-RRT была взята за основу при подготовке настоящей статьи.

Описание алгоритма. Для представления траектории в настоящей работе использовался путь Дьюбинса (Dubins path) [5] – способ пред-

ставления траектории в виде набора дуг и отрезков прямых. Данный способ позволяет описать траекторию движения автомобиля из положения $A(x, y, \theta)$ в положение $B(x', y', \theta')$ с учётом ограничения минимального радиуса поворота автомобиля R_{turn_min} (рисунок 4,а). Сложные траектории, например для манёвра объезда препятствия, строятся из набора элементов пути Дьюбинса.

Робот оснащён датчиками для получения информации об окружающих его объектах. В процессе обработки полученных данных строится карта проходимости (рисунок 4,б), где белым помечены непроходимые участки.

Задачу планирования локальной траектории можно определить следующим образом.

Даны точка текущего положения автомобиля $S(x, y, \theta)$, цель $F(x', y', \theta')$ и карта проходимости M . Необходимо построить такую траекторию Дьюбинса, которая переводит автомобиль из положения S в положение F , чтобы каждая точка траектории являлась проходимой.

Сутью метода RRT является выборка множества промежуточных точек, являющихся корректными состояниями, т.е. теми в которых робот может находиться. Затем из каждой вершины итеративно осуществляется «рост» дерева, посредством проверки возможности соединения с ближайшими точками. Рост дерева прекращается при соединении с целевой точкой либо (при невозможности построить маршрут) после превышения количества итераций. Проверка на возможность соединения двух вершин, как правило, заключается в интерполяции координат с определённым шагом и проверке промежуточной точки на принадлежность к проходимому участку.

Алгоритм CL-RRT схож с RRT, основные отличия заключаются в самих способах выбора

точек, проверки возможности их соединения и обновления дерева решений для оптимизации вычислений.

Общая схема предложенного алгоритма планирования локальной траектории представлена ниже.

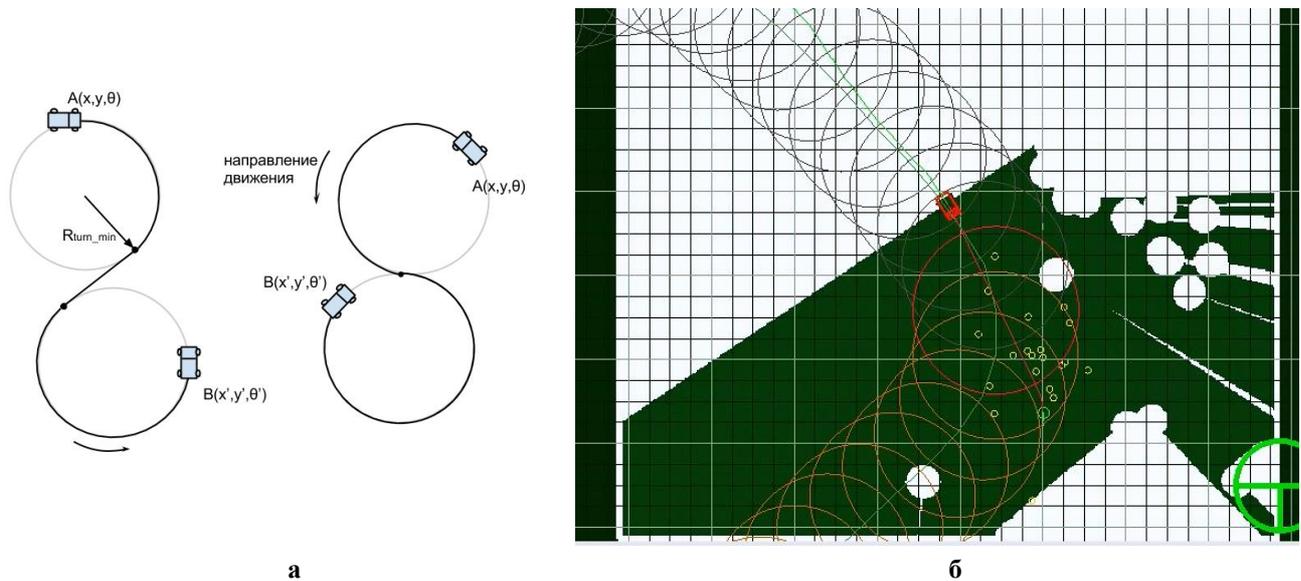


Рисунок 4 – Пример возможных траекторий:
а – пример путей Дьюбинса;
б – карта проходимости, полученная с помощью дальномера SICK

Алгоритм «Рост дерева»

Инициализация.

1. Корень дерева = начальная позиция.
2. Сформировать множество из T_{Nmax} промежуточных точек-целей T .

3. Добавить в T целевые точки.

Итерации. Для каждой нерассмотренной вершины дерева:

4. Если уровень узла $< L_{max}$: выполнить процедуру «Рост вершины».

5. Добавить новые вершины в список нерассмотренных.

Для полученных возможных траекторий:

6. Сортировать «возможные траектории» по длине.

7. Результат – траектория с наименьшей длиной.

Алгоритм процедуры «Рост вершины»

Для каждой i -й точки из T :

1. Рассчитать длину пути l от вершины до T_i .

2. Добавить во временный список пару $\langle l, i \rangle$.

3. Сортировать список по возрастанию l .

4. Выбрать не более V_{max} элементов из списка таких, что путь из текущей вершины в точку T_i является проходимым.

5. Если среди выбранных элементов есть целевая точка, пометить текущую и все предшествующие вершины как «возможная траектория».

6. Присоединить выбранные элементы к текущей вершине дерева.

Дерево решения представляет собой связанный набор вершин. Каждая вершина характеризуется координатами (x, y, θ) , а также кривой Дьюбинса, по которой необходимо проследовать, чтобы попасть в нее из предыдущей вершины. Также вершина имеет флаг «возможное решение», который характеризует принадлежность вершины к траектории, которая приводит в целевую точку.

На этапе инициализации корнем дерева является начальное положение робота. Затем осуществляется процесс выборки промежуточных вершин.

Так как данный алгоритм предназначен для планирования траектории автомобиля, то процесс выбора промежуточных состояний осуществляется из множества точек, лежащих не на всей карте проходимости, а лишь в некоторой области впереди автомобиля (как в [4]). Это позволяет сократить объем вычислений и заранее отсеять неподходящие траектории.

Выборка точек основана на проверке проходимости в случайной точке с координатами, рассчитанными по формуле [4]:

$$s_x = x_0 + r \cos(\theta),$$

$$s_y = y_0 + r \sin(\theta),$$

где

$$r = \sigma_r |n_r| + r_0,$$

$$\theta = \sigma_\theta n_\theta + \theta_0,$$

n_r и n_θ – скалярные случайные величины, распределённые по нормальному закону, σ_r и σ_θ – коэффициенты, характеризующие разброс точек в продольном и поперечном направлениях относительно положения автомобиля (x_0, y_0, θ_0) соответственно, r_0 и θ_0 – центр области разброса точек.

В результате выбирается T_{Nmax} промежуточных точек (рисунок 5) T , к которым добавляются целевые точки (в частном случае – одна).

Далее осуществляется этап «роста дерева», на котором итеративно строится дерево, покрывающее карту проходимости. На данном этапе для каждой вершины из списка непросмотренных вершин осуществляется вычисление расстояний до всех точек из множества T . Расстояние вычисляется как длина кривой Дьюбинса.

Затем к первым V_{max} точкам в порядке возрастания расстояния применяется проверка проходимости маршрута. Выбор наименьших расстояний позволяет получить более прямолинейную траекторию и избавиться от нерациональных траекторий [4].

Если уровень узла больше порога L_{max} , то дальнейший «рост» дерева из данной точки невозможен. Если точка T_i является целевой, то предыдущие узлы помечаются флагом «возможная траектория».

Достижимые точки с минимальным расстоянием добавляются к дереву и в список непросмотренных вершин.

Рост дерева прекращается, когда невозможно добавить новые вершины либо превышено количество итераций.

Затем осуществляется поиск траектории с наименьшей длиной из конечных узлов, помеченных «возможная траектория». Данная траектория представляет собой последовательность узлов, хранящую набор кривых Дьюбинса, следуя по которым, транспортное средство будет перемещаться от начальной до целевой вершины (рисунок 5).

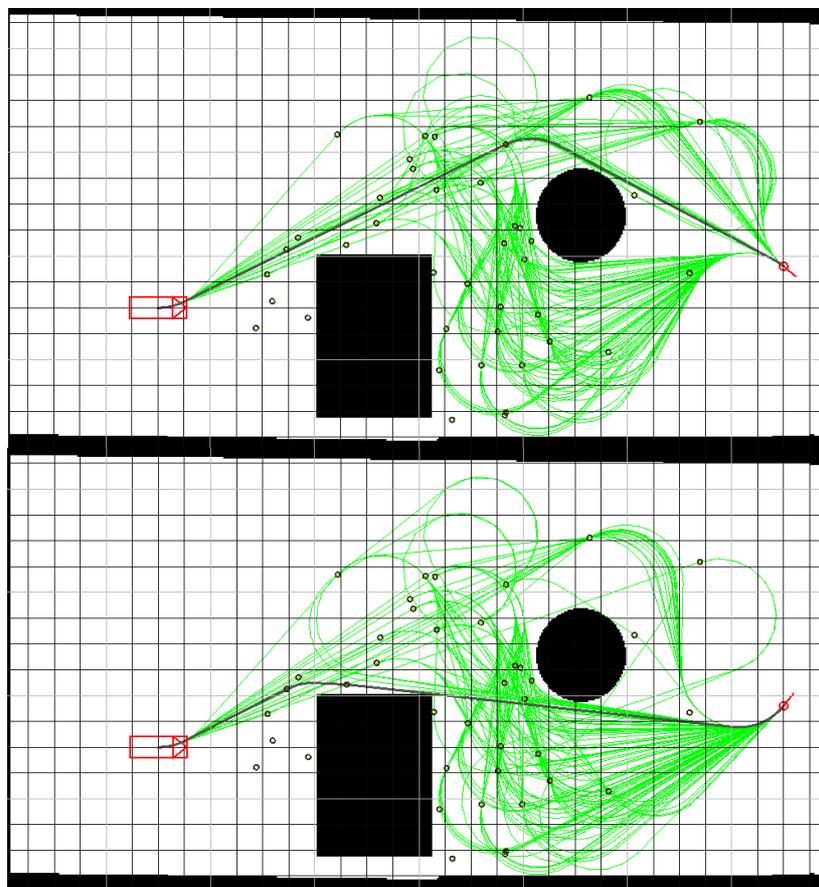


Рисунок 5 – Пример полученных траекторий (тонкая линия) и лучшая траектория (толстая линия). В зависимости от ориентации конечной позиции результирующая траектория проходит по-разному

Полученная траектория отправлялась на исполнение подпрограмме управления движением, которая использует контроллер «упреждающего преследования», как и в [4].

Подпрограмма планирования локальной траектории была реализована на C++ и выполнялась на компьютере с процессором Core-i5 3.0ГГц. Частота работы алгоритма была 5Гц, что было достаточно ввиду ограничения скорости в 7 км/ч правилами соревнований.

Карта проходимости строится на основе лазерного дальномера SICK, размещённого в передней части на бампере автомобиля (рисунок 1) и направленного параллельно плоскости дороги на высоте 40см. Ввиду особенностей трассы соревнований такое расположение датчика позволяло обнаруживать препятствия и контуры дороги.

Пример карты проходимости и полученной траектории показан на рисунке 5.

Заключение. Представленная модификация алгоритма CL-RRT позволяет осуществлять планирование траектории робота-автомобиля в реальном времени для осуществления манёвров по объезду препятствий и следованию в контрольную точку маршрута с учётом неголономности транспортного средства. Команда СКБ РГРТУ заняла первое место на испытаниях автомобилей-роботов «Робокросс-2013», проходивших на

полигоне «Берёзовая пойма» – тестовом полигоне группы ГАЗ.

Результаты проведённых испытаний позволяют судить о потенциальных возможностях алгоритма по расширению и усложнению выполняемых автомобилем-роботом манёвров. В частности, планируется усовершенствовать алгоритм для выполнения параллельной парковки и U-образного разворота, а также воспроизведения уже отработанных манёвров при скорости движения вплоть до 20км/ч.

Библиографический список

1. Hart, P. E.; Nilsson, N. J.; Raphael, B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4 4 (2): 100–107, 1968.
2. Dolgov, D.; Thrun, S.; Montemerlo, M. & Diebel, J. Path Planning for Autonomous Vehicles in Unknown Semi-structured Environments. I. J. Robotic Res., 29, 485-501., 2010.
3. S. M. LaValle, Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning. TR 98-11, Computer Science Dept., Iowa State University, October 1998.
4. Kuwata, Y. et al. Real-time Motion Planning with Applications to Autonomous Urban Driving, 2009.
5. Dubins, L.E. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. American Journal of Mathematics 79 (3): 497–516, July 1957.

УДК 004.896:621.865.8

Ю.С. Глазунова, С.А. Голь, В.С. Леушкин, Т.Н. Нгуен

ПРИМЕНЕНИЕ АНСЦЕНТНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ-РОБОТА

Рассмотрены недостатки практического применения алгоритмов оценки состояния системы на основе линейного и расширенного фильтров Калмана. Описан алгоритм ансцентного фильтра Калмана и рассмотрены вопросы его применения для задачи оценки положения автомобиля-робота в пространстве.

Ключевые слова: ансцентный фильтр Калмана, глобальная система навигации, автомобиль-робот, ансцентное преобразование.

Введение. Задача подсистемы навигации робота-автомобиля заключается в оценке положения и ориентации робота в пространстве. При этом подсистема укомплектована датчиками различной природы: инерциальные – гироскопы, акселерометры, колёсные энкодеры; глобальные – GNSS и магнитный компас. Инерциальные датчики позволяют получать информацию об относительном перемещении робота, в то время

как система ГЛОНАСС позволяет определять положение в глобальной системе координат.

Инерциальные системы характеризуются высоким темпом выдачи информации – порядка 100 Гц, но при продолжительном интегрировании значительно накапливается ошибка. Глобальные системы определения положения (GNSS) и ориентации (магнитный компас) обладают меньшей частотой выдачи информации

(10 Гц для GNSS) и не накапливают ошибки. Однако ошибка определения координат GNSS зависит от множества факторов, влияющих на распространение спутникового сигнала. В свою очередь, измерительные данные компаса зачастую содержат существенные ошибки ввиду искажения естественного магнитного поля Земли вокруг автомобиля-робота различными металлоконструкциями.

Объединение показаний датчиков различной природы и типа выдаваемой информации с целью повышения точности оценки положения представляет собой актуальную задачу в робототехнике. Для этой цели применяются разновидности подхода, предложенного R. Kalman в 1960 [1] – фильтр Калмана.

Целью работы является применение ансамблевого фильтра Калмана для повышения точности оценки положения автомобиля-робота.

Фильтр Калмана. Идея фильтра Калмана заключается в рекуррентной оценке вектора состояния системы на основе вектора наблюдаемого состояния (измерения) и предыдущей оценки состояния системы. При этом на каждой итерации процедуры фильтрации выполняется два шага: «предсказание – корректировка». Предсказание состояния системы осуществляется на основе оценки предыдущего состояния и линейной модели системы. Затем предсказанное состояние корректируется на основе полученных измерений и вероятностных характеристик процесса.

Проблема предсказания будущего состояния системы представлена в работе [4]. Предполагается, что случайная величина x распределена нормально с математическим ожиданием \bar{x} и ковариацией P . Другая случайная величина y связана с x функциональной (в общем случае нелинейной) зависимостью $y = f(x)$, где $f(x)$, по сути, представляет собой уравнение перехода (модель) системы. Возникает задача оценить математическое ожидание и ковариацию вектора y . Для этого необходимо определить функцию плотности трансформированного распределения и определить её статистические характеристики. Для частного случая, когда $f(x)$ является линейной функцией, параметры распределения могут быть получены напрямую. Однако на практике подобные системы встречаются редко, для преодоления данного ограничения применяются различные техники и модификации фильтра Калмана.

Существует расширение фильтра Калмана на нелинейные системы – расширенный фильтр Калмана – Extended Kalman Filter (EKF). В EKF

предсказанная ковариация P'_k определяется посредством линеаризации уравнений модели системы, нахождение P_k осуществляется аналитически как решение линейной системы, что равносильно применению линейного фильтра Калмана для нелинейной системы с линеаризованными уравнениями модели [5].

EKF стал стандартом и широко распространён в различных навигационных устройствах – GNSS приёмниках, блоках инерциальной навигации. Однако его отличает сложность реализации, ввиду необходимости получения матрицы частных производных существует вероятность значительных ошибок в оценке и расхождения фильтра [3]. Также в работе [4] отмечается сложность настройки EKF, связанная с необходимостью введения дополнительного шума в матрицу ковариации для компенсации ошибок линеаризации.

Особенности UKF. Julier и Uhlmann [4] предложен ансамблевый фильтр Калмана – Unscented Kalman Filter (UKF). Для получения статистики вместо линеаризации в UKF используется ансамбленое преобразование (Unscented Transform).

В отличие от EKF, UKF не требует нахождения якобиана, что значительно упрощает реализацию фильтра. Также UKF ввиду свойств ансамблевой трансформации позволяет получать более точную оценку вектора состояния [5].

Ансамбленое преобразование [2] – метод вычисления статистики случайной величины, которая претерпела нелинейное преобразование.

Реализация фильтра. Представленный в [4] алгоритм ансамблевого фильтра показан в общей форме. Однако на практике точно определить распределение шумов и модель их вхождения в систему невозможно. Поэтому часто применяется ряд упрощений и допущений исходного алгоритма.

Принимается, что шум входит в модель аддитивно и распределён нормально. Уравнение обновления состояния примет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= f(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{v}_{k-1}, \\ \mathbf{z}_k &= h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{n}_k, \end{aligned}$$

где $\mathbf{x}_k = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – вектор состояния системы, $\mathbf{z}_k = (z_1, z_2, \dots, z_m)^T$ – вектор измерений, $f(\mathbf{x})$ – уравнение перехода состояния системы, $h(\mathbf{x})$ – уравнение предсказания измерений, векторы шума $\mathbf{v} \sim N(0, \sigma_v)$ и $\mathbf{n} \sim N(0, \sigma_n)$.

Ковариация процесса и измерения на шаге k – Q_k и R_k соответственно.

Алгоритм с данными допущениями примет следующий вид.

Инициализация

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = E[\mathbf{x}_0],$$

$$P_0 = E[(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)^T].$$

Предсказание

Ансцентное преобразование для оценки м.о. вектора состояния.

1. Вычисление списка χ_k^a из $2L+1$ сигма-точек ($L = n$, где n – длина вектора \mathbf{x}):

$$\chi_{k,0} = \mathbf{x}_k,$$

$$\chi_{k,i} = \mathbf{x}_k + \gamma(\sqrt{P_k})^i, i=1, \dots, L,$$

$$\chi_{k,i} = \mathbf{x}_k - \gamma(\sqrt{P_k})^i, i=L+1, \dots, 2L.$$

2. Трансформация сигма-точек через функцию перехода системы:

$$\chi'_{k,i} = f(\chi_{k,i}), i=0, \dots, 2L.$$

3. Оценка м.о.:

$$\bar{\mathbf{x}} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \chi'_{k,i}.$$

4. Оценка матрицы ковариации:

$$P'_k = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [\chi'_{k,i} - \bar{\mathbf{x}}_k][\chi'_{k,i} - \bar{\mathbf{x}}_k]^T + Q_k.$$

Оценка вектора м.о. вектора измерений.

1. Формирование на основе списка трансформированных сигма-точек вектора предсказанных измерений:

$$\mathbf{Z}'_{k,i} = h(\chi'_{k,i}), i=0, \dots, 2L.$$

2. Оценка м.о. вектора измерений:

$$\bar{\mathbf{z}}_k = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \mathbf{Z}'_{k,i}.$$

3. Оценка ковариации измерений:

$$P'_{z,k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [\mathbf{Z}'_{k,i} - \bar{\mathbf{z}}_k][\mathbf{Z}'_{k,i} - \bar{\mathbf{z}}_k]^T + R_k.$$

Оценка взаимной ковариации состояния и измерений:

$$P'_{xz,k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [\chi'_{k,i} - \bar{\mathbf{x}}_k][\mathbf{Z}'_{k,i} - \bar{\mathbf{z}}_k]^T.$$

Этап коррекции

$$K_k = P'_{xz,k} P'_{z,k}^{-1},$$

$\hat{\mathbf{x}}_k = \bar{\mathbf{x}}_k + K_k(\mathbf{z}_k - \bar{\mathbf{z}}_k)$, где \mathbf{z}_k – актуальное измерение.

$$P_k^a = P_k^a - K_k P'_{z,k} K_k^T.$$

Для планирования траектории робота-автомобиля, а также для управления движением

автомобиля по траектории, необходимо иметь возможность получать оценку положения автомобиля в пространстве с частотой не менее 10Гц, так как скорость движения автомобиля ограничена из соображений безопасности – не более 7 км/ч.

Набор датчиков для определения положения и ориентации: GNSS приёмник GNS1316 с темпом выдачи координат – 1Гц; плата определения ориентации (AHRS) UM6-LT, содержащая 3-осевой гироскоп, акселерометр и магнитный компас (10Гц); абсолютный энкодер положения вала руля и инкрементальный энкодер на карданном валу автомобиля (темп выдачи – 70Гц).

Датчики обладают различным темпом выдачи информации и природой сенсорных данных, к тому же подвержены различного рода помехам. Использование датчиков для оценки положения отдельно затруднено ввиду накопления ошибок при интегрировании и неточности модели движения (энкодеры и AHRS) либо из-за низкого темпа выдачи и подверженности влияния помехам прохождения спутникового сигнала (GNSS).

Применение ансцентного фильтра Калмана направлено на объединение данных с различных датчиков для повышения качества оценки положения робота-автомобиля.

Так как датчики обладают различным темпом выдачи информации и не синхронизированы друг с другом, то в качестве события, по которому осуществляется итерация фильтра, был взят момент прихода информации с платы определения ориентации. Данные GNSS при этом экстраполируются на основе предыдущего значения GNSS и оценки угловой и линейной скорости автомобиля до прихода нового положения GNSS. В качестве уравнения экстраполяции используется уравнение перехода состояния $f(\mathbf{x})$. Частота получения данных энкодеров значительно выше, чем AHRS, поэтому на каждой итерации фильтра берётся мгновенное значение полученных данных (предполагается, что показания энкодеров изменяются линейно между итерациями фильтра).

Вектор оцениваемых параметров системы (вектор состояния):

$$\mathbf{x} = (x_p, y_p, \theta, \tilde{\theta}, v)^T,$$

где (x_p, y_p) – положение автомобиля, θ – ориентация, $\tilde{\theta}$ – угловая скорость, v – линейная скорость автомобиля.

Функция перехода состояния системы (модель движения):

$$f(\mathbf{x}) = \begin{cases} x_p' = x_p + v \cos \theta \\ y_p' = y_p + v \sin \theta \\ \theta' = \theta + \tilde{\theta} \\ \tilde{\theta}' = \tilde{\theta} \\ v' = v \end{cases} \quad h(\mathbf{x}) = \begin{cases} x_{GPS} = x_p \\ y_{GPS} = y_p \\ \theta_{GPS} = \theta \\ \theta_{AHRs} = \theta \\ \tilde{\theta}_{GYRO} = \tilde{\theta} \\ \tilde{\theta}_{ENC} = \tilde{\theta} \\ v_{GPS} = v \\ v_{ENC} = v \end{cases}$$

Модель наблюдений представляет собой функцию предсказания показаний датчиков на основе текущего вектора состояния. Вектор измеряемых параметров:

$$\mathbf{z} = (x_{GPS}, y_{GPS}, \theta_{GPS}, \theta_{AHRs}, \tilde{\theta}_{GYRO}, \tilde{\theta}_{ENC}, v_{GPS}, v_{ENC})^T,$$

где $(x_{GPS}, y_{GPS}, \theta_{GPS}, v_{GPS})$ – координаты, курс и скорость GNSS соответственно, θ_{AHRs} – оценка ориентации платы AHRs, $\tilde{\theta}_{GYRO}$ – угловая скорость – гироскоп AHRs, $\tilde{\theta}_{ENC}$ – угловая скорость на основе данных карданного и рулевого энкодеров, v_{ENC} – скорость автомобиля на основе карданного энкодера.

Показания всех датчиков приводятся к единой системе измерений и координат, поэтому перевод вектора состояния в домен измерений осуществляется «копированием» соответствующих значений:

Для реализации ансцентного фильтра Калмана нет необходимости находить матрицу частных производных. Выбор значений матриц ковариации процесса Q и измерений R может осуществляться различными способами на этапе настройки фильтра.

Практический результат. Для проверки работы фильтра были собраны необходимые данные и реализован фильтр в среде MATLAB. Часть траектории лежит непосредственно возле высоких зданий, остальная часть на некотором отдалении – около 30 метров. Это позволяет получить траекторию как со значительной ошибкой GNSS, так и без неё, что способствует отладке фильтра в сложных реальных условиях.

На рисунке 1 сплошной линией показаны сырые данные GNSS, полученные с GNSS приёмника.

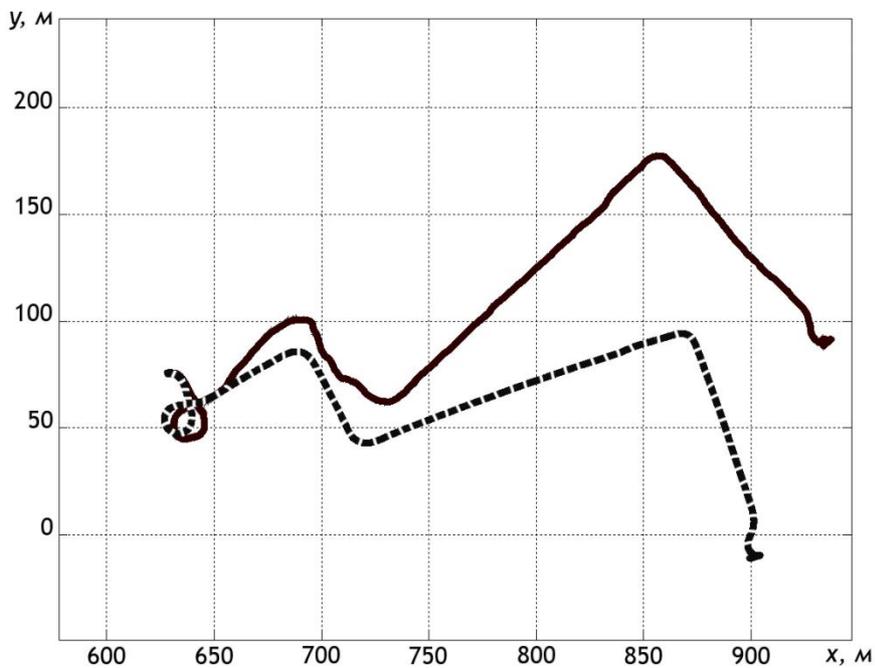


Рисунок 1 – Исходные GNSS данные и результат инерциальной навигации по энкодерам и гироскопу

Автомобиль совершил движение до места разворота общей протяжённостью порядка 300 м возле главного корпуса РГПТУ. При этом движение осуществлялось по узкой дороге, вблизи

высоких стен, что вызвало ухудшение геометрического фактора, и, как следствие, внесло дополнительную погрешность при определении координат GNSS.

Следует отметить, что точного абсолютного позиционирования для управления автомобилем-роботом и планирования траектории не требуется. Точности GNSS (с.к.о. до 15 м) достаточно, чтобы определить, на какой дороге находится автомобиль, но показания GNSS подвержены ошибкам измерения координат, которые проявляются следующим образом:

1) медленный дрейф координат, вызванный неконтролируемыми задержками распространения спутникового сигнала при прохождении тропосферы и ионосферы и т.п.;

2) мгновенные скачки координат, вызванные близкорасположенными зданиями – ухудшением геометрического фактора и т.п.

Для устранения медленного дрейфа можно применять статистическую обработку GNSS сигнала либо использовать сигнал дифференциальных поправок, что потребует применения дорогостоящего дополнительного оборудования.

Планирование и исполнение траектории осуществляется в локальной системе координат, так как координаты препятствий и дороги определяются на основе датчиков, расположенных на транспортном средстве (например, высокоточного лазерного дальномера, положение которого относительно корпуса автомобиля можно изме-

рить точно). Таким образом, необходимо устранить резкие скачки в оценке положения и ориентации, а также предоставить возможность работы в условиях, когда один из измерительных каналов недоступен (поездка в тоннеле). Дрейф координат будет устраняться в другой подсистеме управления, которая осуществляет привязку положения робота к карте и планирование глобальной траектории.

На рисунке 1 пунктирной линией отмечена оценка координат на основе инерциального счисления (энкодеры и гироскоп). Траектория более гладкая, и имеет больше отсчётов положения (в 10 раз больше, чем GNSS, что соответствует частоте дискретизации 10 Гц). Однако из-за неточности модели движения и ошибок в оценке параметров автомобиля (длина колёсной базы, длина окружности колеса, соотношение положения руля и угла поворота колёс и т.п.) наблюдается значительный уход в точке финиша, порядка 100 метров, хотя фактически эти точки должны совпадать.

При объединении информации с различных датчиков с помощью ансамблевого фильтра Калмана получен следующий результат (рисунок 2 пунктирная линия).

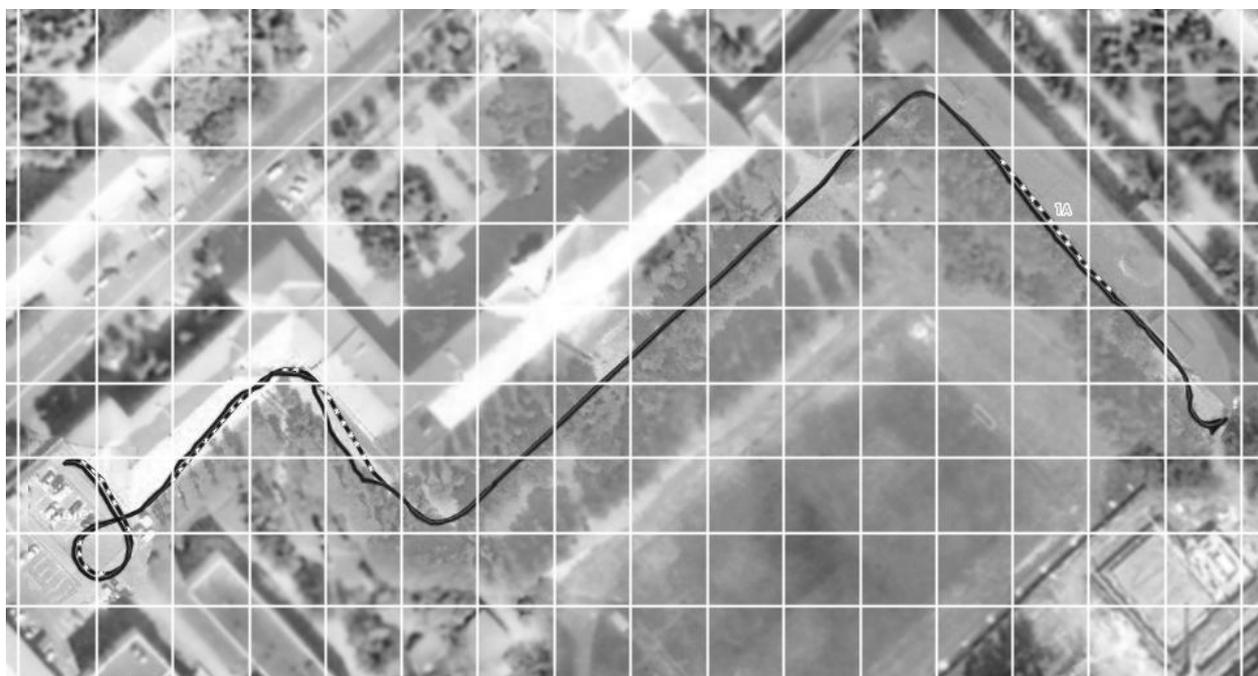


Рисунок 2 – Результат оценки положения автомобиля-робота, отображённый на карте Google Maps: отфильтрованная траектория (пунктир) и исходные данные GNSS (сплошная), масштаб клетки 20 м

Темп выдачи оценки положения автомобиля-робота составил 10 Гц, что в 10 раз чаще, чем показания используемого GNSS приёмника. Также устранены скачки координат (порядка 4 метров) вблизи высоких зданий.

Данной производительности фильтра доста-

точно для решения задачи траекторного управления.

Заключение. В работе представлено описание применения ансамблевого фильтра Калмана для задачи оценки положения и ориентации робота-автомобиля в пространстве. Реализованный

фильтр обладает необходимой производительностью для применения его в составе бортовой информационно-измерительной системы. Положительным качеством реализованного фильтра является исключение скачков координат, величина которых составляла до 4 метров при использовании только GNSS, а также обеспечение большей частоты выдачи информации, чем используемый GNSS приёмник.

К недостаткам полученного фильтра стоит отнести то, что текущая модель системы учитывает только ориентацию автомобиля в горизонтальной плоскости, что может сказаться на корректности оценки скорости при движении по наклонным поверхностям (мост или уклон). Также недостатком является применение углов Эйлера в качестве характеристики ориентации автомобиля. Более предпочтительным является использование кватерниона, так как в данном случае отсутствует проблема сингулярности в точке переходе угла с $-\pi$ на π радиан.

Также возможно повышение быстродействия алгоритма фильтрации с помощью выполнения извлечения квадратного корня из матриц

ковариации только на этапе инициализации фильтра.

Библиографический список

1. Kalman R. E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems – Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, 1960 – p. 3545.
2. Wan E.A., Van Der Merwe R., The unscented Kalman filter for nonlinear estimation – Proc. of IEEE Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium 2000, – pp. 153 –158.
3. Julier S., Uhlmann J., Unscented filtering and nonlinear estimation – Proc. IEEE, vol. 92, no. 3, 2004 – pp.401 – 422.
4. Julier S., Uhlmann J., A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems – In International Symposium Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, Vol. 3068, 1997 – pp. 182 – 193.
5. Van Der Merwe R., Wan E.A., Sigma-Point Kalman Filters for Integrated Navigation – Proceedings of the 60th Annual Meeting of The Institute of Navigation, 2004 – pp. 641 – 654.
6. Van Der Merwe R., Wan E.A., The Square-Root Unscented Kalman Filter for State and Parameter Estimation – Proceedings of ICASSP, vol. 6, 2001 – pp. 3461 – 3464.

УДК 004.896:621.865.8

В.В. Артёмкин, С.С. Лукаша, А.Ю. Маликов

РЕАЛИЗАЦИЯ СЦЕНАРИЯ «СЛЕДУЙ ЗА МНОЙ» БЕСПИЛОТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЕМ-РОБОТОМ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЛИДАРА И ВИДЕОДАТЧИКА

Рассматриваются вопросы реализации алгоритма поиска визуальной метки и анализа препятствий на местности с использованием данных видеодатчика и лидара, установленных на транспортном роботе.

Ключевые слова: *лидар, видеодатчик, сценарий «следуй за мной», автомобиль-робот.*

Введение. В современной транспортной инфраструктуре очень часто можно встретить реализацию сценария, называемого «следуй за мной». Одним из распространённых примеров реализации данного сценария может служить специальная аэродромная служба, которая помогает лётчикам выполнять руление на территории аэропорта. Для этого используются обычные автомобили, движущиеся перед самолётом и указывающие необходимое направление движения.

Однако в ряде случаев, когда ведомое транспортное средство перевозит опасные для жизни и здоровья человека грузы, то имеет смысл в качестве ведомых использовать специ-

альные автомобили-роботы, которые способны самостоятельно в автоматическом режиме выполнять следование за ведущим движущимся объектом – автомобилем или визуальной меткой.

Реализация на практике автоматического управления движением такого транспортного средства по пересеченной местности по сценарию «следуй за мной» требует разработки специальных систем управления автомобилями-роботами, основанных на использовании интеллектуальных электронных систем машинного зрения и анализа препятствий на местности [1].

Целью работы является разработка алгоритмов поиска электронной системой машинно-

го зрения специальной визуальной метки (маяка) ведущего средства и апробация этих алгоритмов в составе интеллектуальной системы управления автомобилем-роботом.

Теоретическая часть. В настоящей работе рассматриваются алгоритмы реализации сценария «следуй за мной» в беспилотной системе управления автомобилем-роботом, когда ведомым объектом выступает автомобиль-робот «ГАЗель БИЗНЕС» СКБ РГРТУ (рисунок 1), а ведущим объектом выступает как другой автомобиль, так и человек. При этом ведущий объект несёт на себе малогабаритный активный или пассивный маяк, за которым и следует ведомый автомобиль. Задача усложняется тем, что автомобиль-робот помимо следования за меткой должен анализировать пространство перед автомобилем на наличие препятствий и преодолевать их с учётом массогабаритных параметров самого автомобиля.



Рисунок 1 – Автомобиль-робот «ГАЗель БИЗНЕС» СКБ РГРТУ

Современная реализация системы управления автомобилем-роботом «ГАЗель БИЗНЕС» СКБ РГРТУ имеет развитую бортовую информационно-измерительную систему, включающую в себя видеодатчики, лазерные сканеры, ультразвуковые датчики, гироскопы, сенсоры глобальной системы позиционирования (GPS и ГЛОНАСС), RGBD-камеры (Microsoft Kinect). Кроме этого, в вычислительной системе автомобиля-робота имеются алгоритмы траекторного управления. В итоге задача разрабатываемого алгоритма сценария «следуй за мной» сводится к предоставлению в реальном времени данных для системы управления о направлении движения автомобиля-робота с учетом препятствий на местности.

Первый этап в решении поставленной задачи заключается в выборе типов сенсоров, которые необходимы для распознавания и отслеживания метки на ведущем объекте, а также для обнаружения препятствий на местности. При

этом для более точной оценки местоположения автомобиля-робота на борту расположены несколько датчиков и сенсоров различных типов, которые обеспечивают максимальную информативность по траектории движения.

При выборе датчиков анализ показал, что сенсоры глобальной системы позиционирования являются универсальным средством определения местоположения на большей части поверхности земного шара, но приемлемые погрешности в позиционировании на открытой местности превращаются в значительные отклонения при использовании в городской среде и в полную невозможность использования этих сенсоров в закрытых помещениях [2].

Рассмотренные RGBD-камеры типа Microsoft Kinect также являются одним из бюджетных вариантов для получения трёхмерного изображения, но они практически полностью теряют свою функциональность при наличии засветов, что очень сильно ограничивает их использование на открытой местности.

Исследованные лазерные системы, основанные на лазерной дальнометрии, являются более эффективными средствами для обнаружения препятствий на местности. При этом в области робототехники распространено использование лазерных сканеров с двумерной диаграммой направленности и лазерных устройств, предоставляющих трёхмерное изображение. Последние могут быть основаны либо на перемещении сканеров с двумерной диаграммой направленности, либо быть изначально трёхмерными, к которым относятся лидары *Velodyne* (рисунок 2).

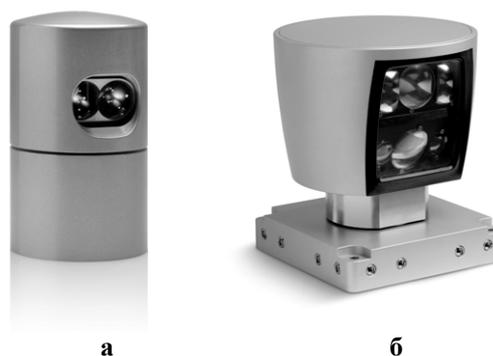


Рисунок 2 – Лидары высокого разрешения компании Velodyne: а – HDL-32E; б – HDL-64E

Принцип действия лидаров высокого разрешения *Velodyne* основан на использовании вертикально расположенной линейки из 32 или 64 светодиодных лазера, которая непрерывно вращается вокруг вертикальной оси. Каждый из лазеров имеет собственный угол наклона по отношению к горизонтальной плоскости, что позволяет получать трёхмерное изображение с углом

обзора 360° по горизонтали и порядка 40° по вертикали. Частота вращения головки лидара составляет 15 Гц, в результате чего каждую секунду устройство предоставляет около 700 тысяч измеренных расстояний [3].

Используя данное устройство, можно осуществлять навигацию робототехнической платформы в различных условиях. Для решения данной задачи возможно также использование лазерных сканеров с двумерной диаграммой направленности, но в случае функционирования объекта в сложных средах, требующих выделения препятствий на разных уровнях (мостовые и арочные пролёты, тоннели, области с густой растительностью, котлованы, карьеры), по крайней мере, одного двумерного лазерного сканера может быть недостаточно. Поэтому трёхмерные лазерные сканеры являются более эффективным средством для обнаружения и преодоления препятствий на пути автомобиля-робота, ввиду чего предложено использовать лидар *Velodyne HDL-32E*.

Однако относительно низкое разрешение лидара *Velodyne* по вертикали практически не позволяет обнаруживать и выделять малогабаритные объекты на одиночном скане. Лишь в случае когда ведущим объектом является автомобиль, использование одного такого устройства является возможным для решения текущей задачи обнаружения ведущей метки.

Ввиду возникающих сложностей при использовании вышеописанных типов датчиков предлагается использовать малогабаритную визуальную метку, которая может быть распознана с помощью видеодатчика. Основными требованиями к данному типу устройств являются разрешение не ниже 1980×1080 пикселей, а также класс защиты не менее IP65 для возможности установки на автомобиль-робот. В качестве такого датчика была выбрана камера наружного видеонаблюдения *Weward BD3575*.

Рассмотрим алгоритмы обработки информации с двух выбранных датчиков. Данные с лидара используются для анализа проходимости пространства перед автомобилем. Устройство предоставляет данные в виде массива, где каждый элемент содержит информацию об угловом положении сканирующей головки, номере лазера и измеренной дистанции. Ввиду особенностей конструкции лидара порядок измерений в линейке лазеров не последовательный, а чередующийся из двух сегментов $(0, 16, 1, 17, \dots, 14, 30, 15, 31)$.

Для дальнейшего использования данных полученные пакеты необходимо упорядочить в соответствии с номером лазера. Имея информа-

цию о вертикальном угле лазера (как уже было сказано, каждый лазер имеет определённый угол наклона по отношению к горизонтальной плоскости), горизонтальном угле положения линейки, а также измеренное расстояние, несложно вычислить координаты полученной точки в трёхмерном пространстве.

Тогда имеем: M – массив точек, полученных с лидара за один полный оборот головки вокруг оси, который будем называть сканом (m_i – i -я точка скана, $m_i \in M$); $m_{i_x}, m_{i_y}, m_{i_z}$ – координаты точки в трёхмерном пространстве; N_M – количество точек в одном скане.

Пусть N_{mc} – количество циклов измерений за один оборот, $N_{mc} = N_M / 32$. Для каждого вектора, попарно соединяющего точки цикла, вычислим угол наклона к горизонтальной плоскости (XOY), который определится как

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{m_{i_z} - m_{(i+1)_z}}{\sqrt{(m_{i_x} - m_{(i+1)_x})^2 + (m_{i_y} - m_{(i+1)_y})^2}}\right), \quad (1)$$

$i = 1, \dots, 31$.

Вводя некоторый порог по углу h_α , который определяется параметрами проходимости используемого транспортного средства, все точки, не удовлетворяющие данному порогу, отмечаются как непроходимые.

На следующем этапе обработки данных анализируется высота расположения препятствий. Для этого введём два порога: нижний h_L и верхний h_H . Нижний порог определяется параметрами проходимости транспортного средства – максимальной высотой препятствия, которое оно способно преодолеть. Верхний порог определяется габаритами транспортного средства – его высотой. Все используемые пороги задаются с некоторым запасом для обеспечения гарантированной проходимости. Все точки, отмеченные как непроходимые на предыдущем этапе, анализируются по высоте, и в случае попадания между верхним и нижним пределом остаются помеченными как непроходимые, а остальные отмечаются как проходимые. Введение верхнего порога позволяет успешно преодолевать транспортным средством мостовые, тоннельные и прочие подобные сооружения с удовлетворяющими габаритными размерами.

Следующим этапом обработки данных является построение карты проходимости на основе результатов предыдущего анализа трёхмерного скана. Одним из вариантов представления карты проходимости является бинарное (или двухцвет-

ное) изображение, на котором в зависимости от принятого масштаба каждый пиксель обозначает проходимость или непроходимость участка пространства вокруг транспортного средства.

Пусть D – массив из всех непроходимых точек d_i текущего скана размером K_D , K и M – длина и ширина карты проходимости, соответственно, измеряемая в пикселях; $p_{k,m}$ – единичный пиксель на карте проходимости; s – масштаб карты проходимости в пиксели/метр.

Тогда

$$p_{k,m} = \begin{cases} 0, & \text{если } \exists d_i, \lfloor sd_{i_x} \rfloor = k \text{ и} \\ & \lfloor sd_{i_y} \rfloor = m, i = 1, \dots, K_D \\ 1, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (2)$$

где $\lfloor x \rfloor$ – выделение целой части числа x . Таким образом, осуществлено проецирование непроходимых точек на плоскость. Поскольку информация о проходимости пространства за пределами непроходимых точек отсутствует (лазерный луч отразился от препятствия), то будем считать его непроходимым и проведём экстраполяцию по ходу сканирующего луча. Для этого определим параметры уравнений прямых, проходящих через точки начала координат (расположение сканера) и спроецированную непроходимую точку. Формируя уравнения в виде $y = ax + b$, имеем:

$$\begin{cases} m_1 = ak_1 + b \\ m_2 = ak_2 + b, \end{cases} \quad (3)$$

откуда $a = (m_1 - m_2) / (k_1 - k_2)$, $b = m_2 - ak_2$. Учитывая, что $m_1 = 0$ и $k_1 = 0$, получаем окончательно: $a = m_2 / k_2$. Для удобства использования полученных карт проходимости осуществим смещение. В общем случае для смещения точки расположения лидара в центр изображения имеем:

$$\begin{cases} k' = k + K / 2, \\ m' = m + M / 2, \end{cases} \quad (4)$$

Используя полученные уравнения прямых, отображаем как непроходимый участок на прямых от первоначальной непроходимой точки до границы изображения. Пример полученной карты проходимости для передней полуплоскости сканирования показан на рисунке 3.

Для дальнейшего формирования карты проходимости могут использоваться несколько подходов, например: метод заливки, распространённый в графических редакторах, метод формирования коридора проходимости и др. Для реали-

зации последнего метода сделаем предположение, что пространство непосредственно перед автомобилем является проходимым, и, начиная от точки расположения лидара вдоль продольной оси автомобиля прокладываем коридор до возникновения непроходимого участка. Пример карты проходимости, полученной на основе использования предложенного алгоритма, представлен на рисунке 4.

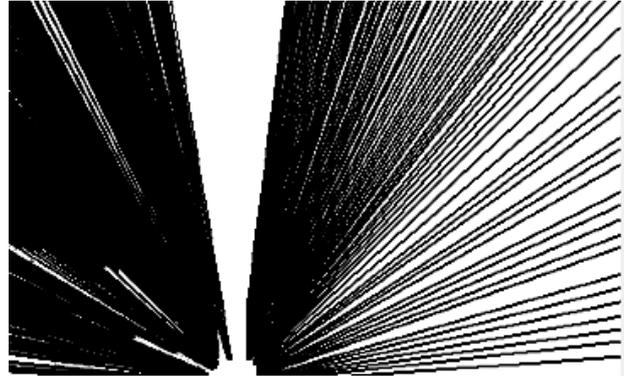


Рисунок 3 – Пример полученной карты проходимости на этапе экстраполяции хода сканирующего луча (чёрным цветом отмечены непроходимые участки, белым – проходимые)



Рисунок 4 – Пример построенной карты проходимости на основе использования рассмотренного алгоритма (белым цветом выделен коридор проходимости, чёрным – непроходимый участок)

Теперь перейдём ко второй части алгоритма, в которой осуществляется поиск метки на основе данных с видеодатчика. Важное значение имеет выбор параметров визуальной метки с учётом малых массогабаритных параметров, а также её использования в различных погодных условиях, при разной освещённости. Метка должна обладать контрастным по отношению к окружающему пространству цветом с математически описываемой формой и чёткими границами. В ходе проведённых исследований было выявлено, что одним из наиболее редких цветов в окружающей среде является розовый, поэтому, с учётом остальных условий, в качестве визуальной метки был выбран розовый круг с чёрными границными окружностями (рисунок 5).

Общая задача алгоритма состояла в получении координат центра метки на изображении с видеодатчика и дальнейшей передаче этой информации управляющей системе автомобиля. Для реализации алгоритма использовались методы программной библиотеки *OpenCV* версии 2.4.6.

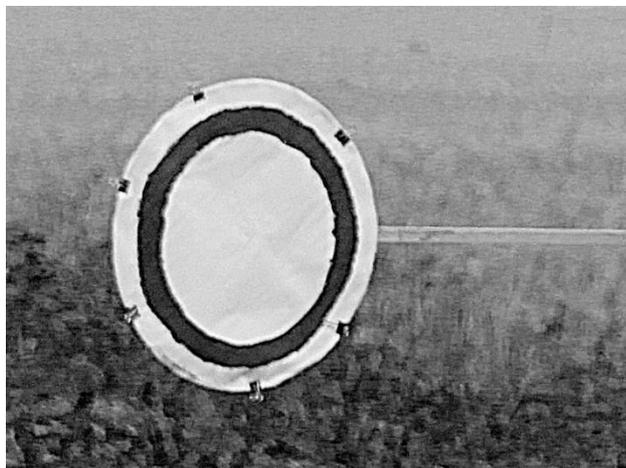


Рисунок 5 – Визуальная метка ведущего объекта

После осуществления захвата изображение подвергалось первичной обработке, которая заключалась в размытии для удаления шума на изображении. Затем к полученному изображению применяется детектор границ Кенни [4], в результате чего получается бинарное изображение с множеством линий, характеризующих границы объекта. Среди найденных границ выделим контуры объектов. Такой подход позволит значительно сократить требуемые вычислительные ресурсы.

Следующий этап обработки изображения заключается в поиске метки по заданным характеристикам, и первая из них – форма объекта. Для выделения всех объектов, имеющих форму круга, осуществляется вычисление координаты центральной точки контура p на основе моментов:

$$p_x = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad p_y = \frac{m_{01}}{m_{00}}, \quad (5)$$

где m_{00}, m_{01}, m_{10} – пространственные моменты контура [4]. Находя дисперсию по расстоянию от центра до точек контура и сравнивая его с некоторым порогом h_{dc} , определяем, является ли рассматриваемый контур кругом.

Среди найденных объектов круглой формы проводим анализ по размеру. Ввиду известных размеров исходной метки можно ввести некоторый диапазон возможных значений площади метки на изображении. Можно выделить два этапа: первоначально вычисляется площадь контура с использованием метода *contourArea* [4], а затем вычисляется площадь круга с использова-

нием максимального расстояния от центра до точки контура в качестве радиуса. Сравнение полученных значений на двух этапах позволяет отсеять контуры, близкие к круговым.

Последний этап – анализ цветового содержания объекта. Как показывает практика, к данному этапу остаются не более трёх контуров, поэтому использование алгоритма с высокой вычислительной сложностью не сказывается существенно на общей вычислительной сложности программы. Задача алгоритма на данном этапе – по имеющимся записям метки отследить и сохранить все вариации цветов при разном освещении. После этого в процессе работы программы осуществляется сравнение цвета имеющихся пикселей с ранее сохранёнными и нахождение минимального отклонения. Введение порога по отклонению позволяет определить принадлежность контура к метке. Ввиду того, что визуальная метка не содержит неровностей на поверхности и, соответственно, дисперсия цвета внутри контура минимальна, осуществляется расчёт вектора дисперсии цвета пикселей внутри контура по трём каналам. Здесь также вводится пороговое значение, определяющее принадлежность контура к метке.



Рисунок 6 – Лидар Velodyne HDL-32E и видеодатчик Beward BD3575, установленные на крыше автомобиля-робота «ГАЗель БИЗНЕС»

Стоит отметить, что приоритет между двумя частями предложенного алгоритма остаётся за данными с лидара, поскольку при обнаружении препятствия необходимо обеспечивать безопасную траекторию движения, несмотря на расчетное направление на метку.

Экспериментальная часть. Испытание разработанного алгоритма в составе разработанной системы управления автомобилем-роботом проводилось на двух полигонах: на территории кампуса РГРТУ и на испытательном полигоне «Берёзовая пойма» завода «ГАЗ». Для этого на

крыше автомобиля-робота «ГАЗель БИЗНЕС» были установлены видеодатчик и лидар указанных ранее моделей (рисунок 6). В ходе эксперимента была исследована эффективность алгоритма как в условиях городской среды, так и в лесо-полевых районах. На рисунке 7 показаны примеры выделения проходимых и непроходимых участков на основе скана с лидара *Velodyne HDL-32E* и построенные карты проходимости. На рисунке 8 показано функционирование алгоритма при преодолении мостовых сооружений. Видно, что несмотря на наличие препятствия на пути платформы в виде надземного пешеходного перехода алгоритм выделил этот участок как проходимый после анализа высоты пролёта. На рисунке 9 показаны изображения с визуальной меткой, на котором используемый алгоритм осуществил её выделение с вычислением центра.

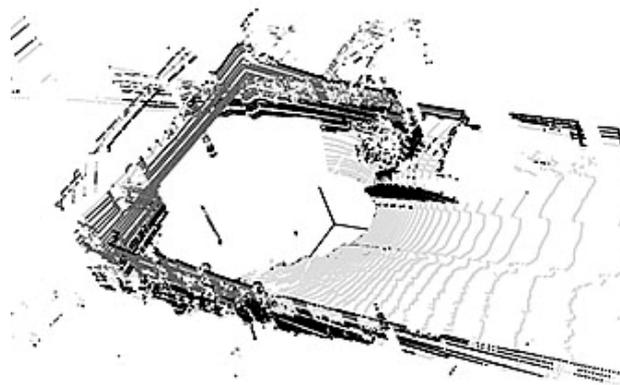


Рисунок 7 – Выделение проходимых и непроходимых точек на скане с лидара (чёрным цветом показаны непроходимые точки, светло-серым – проходимые, тёмно-серым – непроходимые, но находящиеся выше габаритов транспортного средства)

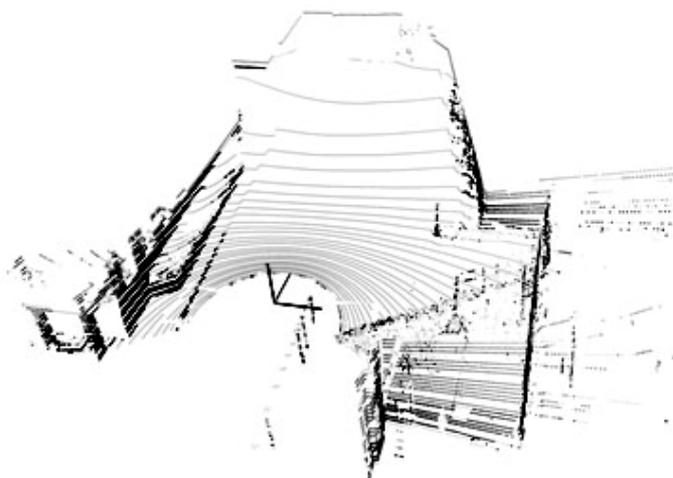
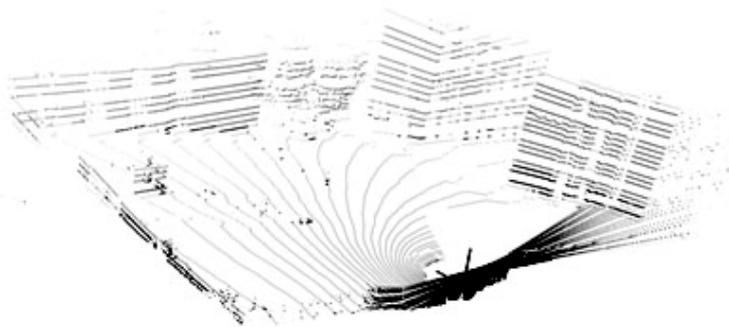


Рисунок 8 – Примеры построения карты проходимости на основе сканов с лидара (слева показаны трёхмерные лазерные сканы, справа – соответствующие им карты проходимости)

Предложенный алгоритм использовался на автомобиле-роботе в ходе соревнований «Робокросс – 2013», где показал свою эффективность, в результате чего команда СКБ РГРТУ «Аврора» одержала победу в данных соревнованиях.

Выводы. В результате проведённых иссле-

дований был разработан и исследован алгоритм, успешно реализующий сценарий «следуй за мной» при автоматическом управлении автомобилем-роботом. Высокая эффективность алгоритма и его относительная простота реализации позволяют использовать предложенный алго-

ритм поиска визуальной метки и преодоления препятствий с использованием данных видеодатчика и лидара в современных системах

управления перемещением транспортных роботов.

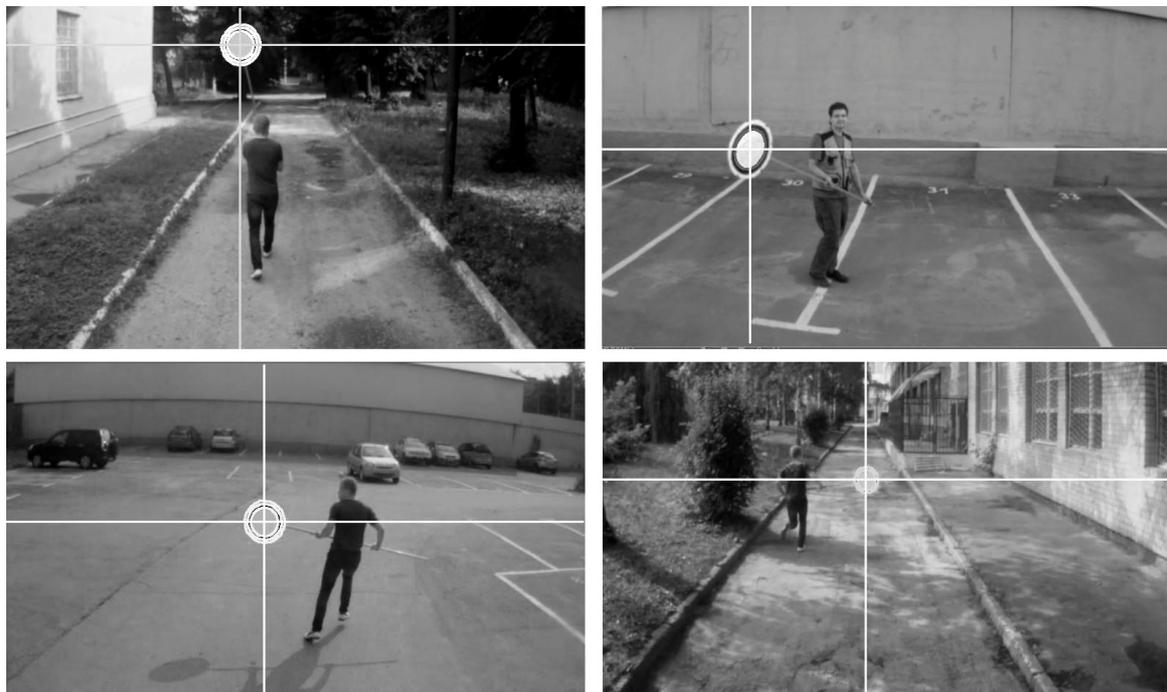


Рисунок 9 – Примеры изображений с найденной визуальной меткой в различных условиях

Библиографический список

1. S. Thrun, W. Burgard, D. Fox. Probabilistic robotics. Intelligent robotics and autonomous agents. MIT Press, September 2005.
2. O. Wulf, A. Nuchter, J. Hertzberg, B. Wagner.

Benchmarking Urban 6D SLAM. Lecture Notes for IROS 2007. October, 2007.

3. F. Moosmann and C. Stiller. Velodyne SLAM. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2011.

4. G. Bradski A. Kaehler. Learning OpenCV. O'Reilly Media, 2008.

УДК 004.896:621.865.8

А.Г. Борисов, С.А. Голь, С.С. Лукаш

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ТРЁХМЕРНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СКАНОВ В ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ДЛЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Рассматриваются вопросы повышения эффективности построения трёхмерных карт окружающих пространств для навигации робототехнических платформ. Исследуются различные алгоритмы предварительной обработки данных трёхмерных лазерных сканов, а также некоторые характеристики алгоритмов для сопоставления сканов.

Ключевые слова: трёхмерные лазерные сканеры, навигация, локализация, мобильный робот, трёхмерная цифровая карта.

Введение. Системы лазерного сканирования нашли широкое применение в области навигации робототехнических платформ. Всё большее и большее распространение получают трехмерные лазерные сканеры, часть из которых по

строена на основе перемещения сканеров с двумерной диаграммой направленности, а другие изначально создавались как трёхмерные и к таким сканерам относят лидары компании Velodyne.

Главным отличием таких лидаров от промышленных лазерных сканеров, используемых в основном в строительстве, является их высокое быстродействие. Информация об окружающем пространстве предоставляется в виде массива данных, называемого сканом. Каждый элемент массива содержит данные о положении точки в трёхмерном пространстве. Совершая до 15 оборотов в секунду, лидар Velodyne HDL-32E способен предоставлять сканы с той же частотой, каждый из которых содержит примерно 58560 точек [1]. Данную информацию можно использовать для обнаружения и преодоления препятствий, встречающихся на пути платформы, но более эффективное их использование выражается в построении трёхмерных карт пространств на

основе совмещения множества сканов с одновременным анализом перемещения – т.е., по сути, решение задачи SLAM (*Simultaneous Location and Mapping* – метод одновременной навигации и картографирования).

Цель работы – оценка эффективности существующих алгоритмов предварительной обработки и сопоставления трёхмерных сканов с использованием реальных данных. Рассматриваемые методы будут исследованы на реальных данных, полученных с помощью лидара Velodyne HDL-32E, установленного на автомобиле-роботе «ГАЗель БИЗНЕС» студенческого конструкторского бюро Рязанского радиотехнического университета (СКБ РГРТУ) (рисунок 1).



Рисунок 1 – Автомобиль-робот «ГАЗель БИЗНЕС» СКБ РГРТУ

Сканирование осуществлялось на территории кампуса университета, где можно встретить территории с большим количеством зданий, а также менее застроенные места спортивного комплекса. Спутниковый снимок исследуемой территории показан на рисунке 2.

Теоретическая часть. Для сопоставления данных, получаемых с лазерных сканеров, в большинстве случаев используется итеративный алгоритм ближайших точек (*Iterative Closest Point - ICP*) [1]. Алгоритм предложен в работах [2] и [3], а в дальнейшем подвергся ряду изменений, в результате чего возникли его различные варианты [4]. Пусть M и D – два массива точек в трёхмерном пространстве, m_i и d_i – пара соответствующих точек, $m_i \in M$ и $d_i \in D$, а R и t – искомые трансформации вращения и перемеще-

ния. Задача алгоритма *ICP* заключается в минимизации весовой функции вида

$$E(R, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|m_i - (Rd_i + t)\|^2, \quad (1)$$

где $\|x\|$ – евклидово расстояние, N – число соответствующих пар точек.

Предлагается использовать один из наиболее простых вариантов алгоритма *ICP*, основанного на анализе межточечного расстояния. В нём можно выделить два основных этапа:

- нахождение ближайших точек на двух имеющихся сканах с использованием k -мерного дерева [6];

- нахождение оптимального преобразования (R, t) , при котором выражение (1) имеет минимальное значение.



Рисунок 2 – Спутниковый снимок кампуса РГРТУ (чёрной линией показана приблизительная траектория основного замкнутого цикла)

Решение второго этапа может быть осуществлено с использованием сингулярного разложения [5]. Пусть μ_M и μ_D – центры масс точек M и D соответственно, тогда

$$\mu_M = \frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} m_i, \quad (2)$$

$$\mu_D = \frac{1}{N_D} \sum_{i=1}^{N_D} d_i, \quad (3)$$

где N_M и N_D – количество точек в массивах M и D соответственно. Далее вычисляем $m'_i = m_i - \mu_M$ и $d'_i = d_i - \mu_D$.

Пусть M' и D' – конкатенации точек m'_i и d'_i . Вычислим матрицу W :

$$W = M'D'^T, \quad (4)$$

и осуществим её сингулярное разложение

$$W = U\Lambda V^T. \quad (5)$$

Можно показать, что оптимальным решением R и t , которое минимизирует весовую функцию (1), будет $R = UV^T$ и $t = \mu_M - R\mu_D$.

Вышеописанный вариант алгоритма *ICP* реализован в программной библиотеке *PointCloudLibrary*.

Прежде чем перейти к непосредственному рассмотрению применения алгоритмов на практике, обратим внимание на ещё один немаловажный факт обработки сканов с лидара Velodyne. Несмотря на то, что данное устройство обладает высокой скоростью сканирования, при движении робототехнической платформы возникают искажения в получаемых сканах. Визуально это можно наблюдать в виде смещения точек, находящихся вблизи нулевой отметки (до и после неё). На рисунке 3 показан такой эффект, полученный при скорости движения платформы 12 км/ч. При этом видно смещение плоскости стены и несовпадение концентрических дуг на плоскости земли.

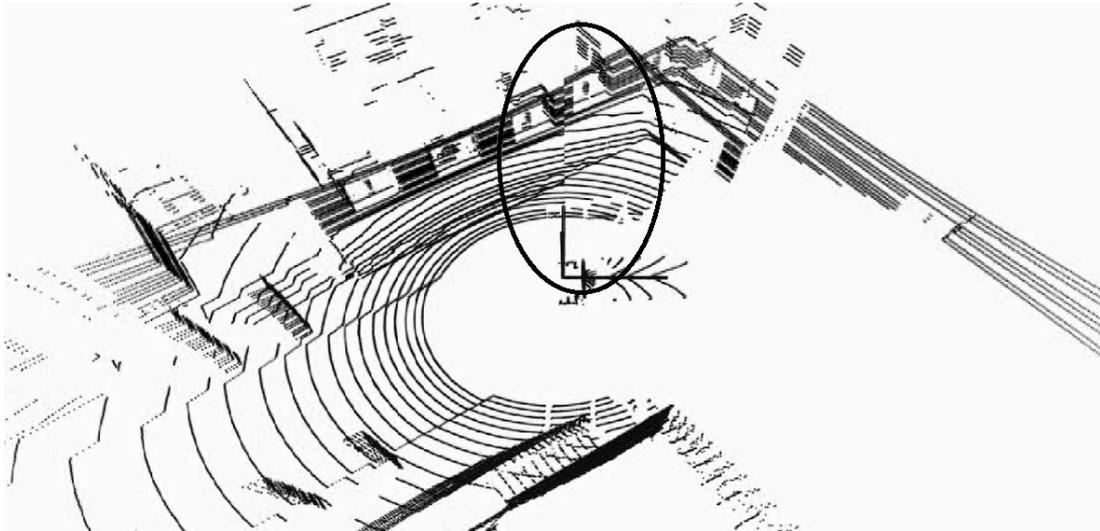


Рисунок 3 – Смещение точек до и после нулевой отметки при движении робототехнической платформы

Коррекция получаемого изображения может быть выполнена рядом способов, один из которых описан в работе [9]. Основной задачей в общем случае является определение следующего местоположения платформы при текущем поло-

жении сканера, для чего возможно использовать простые интерполирующие алгоритмы либо более сложные – вероятностные. В настоящей работе ввиду невысокой скорости перемещения платформы предлагается считать перемещение

между двумя соседними сканами линейным и использовать преобразование, полученное в предыдущем сопоставлении. Пусть M_j – текущий скан, R_j – матрица перехода от M_{j-1} к M_j . Тогда скорректированный скан M'_j будет образован конкатенацией точек m'_i , которые определяются как

$$m'_i = \arctg\left(\frac{m_{i_y}}{m_{i_x}}\right) \cdot R_{j-1} \cdot m_i. \quad (6)$$

Рассмотрим теперь подходы к использованию данного алгоритма на практике. Существуют две основных концепции применения алгоритма *ICP* для сопоставления сканов: последовательное попарное сопоставление сканов (часто называемое *Pairwise ICP* – попарный *ICP*) и сопоставление каждого нового скана со всеми предыдущими, уже сопоставленными сканами, образующими метаскан (часто называемое *Multiscan ICP* – мультискановый *ICP*). Преимущество первого алгоритма – относительно небольшое количество точек, используемых для сопоставления, которое равно сумме количества точек двух сканов. В случае если все сканы содержат одинаковое количество точек, то и время вычисления преобразования будет примерно одинаковым, что в ряде случаев даёт возможность использования данного подхода в задачах реального времени. Но такой подход имеет и существенный недостаток – ввиду того, что сопоставление каждой пары сканов является неточным, происходит накопление ошибки, что в итоге может привести к неудовлетворительному результату сопоставления при использовании большого количества сканов. Мультискановый *ICP* позволяет использовать гораздо большее число точек для поиска соответствия, что повышает точность, но приводит к значительному увеличению требуемых вычислительных ресурсов, которое продолжает возрастать по мере увеличения сопоставленных сканов. В то же время такой подход не избавляет от фактора накапливающейся ошибки, хотя она значительно меньше и в ряде случаев ею можно пренебречь. Мультискановый *ICP* удобно использовать для постобработки, когда требуется более точное построение карты или коррекция траектории на основе полученных ранее сканов.

Одним из наиболее простых и эффективных способов сокращения требуемых вычислительных ресурсов является удаление неинформативных точек из полученных сканов. Такие точки

могут не только усложнять анализ преобразования, но и вносить значительные ошибки. На рисунках 3 и 4 показан типичный скан с *Velodyne HDL-32E*. На нём хорошо видны концентрические дуги, которые получены в результате сканирования земной поверхности. Если считать, что робототехническая платформа располагается на ровной поверхности, то координаты каждой из точек, входящих в состав этих дуг, несложно вычислить. Для этого необходимо знать положение лазерного сканера на платформе и угол каждого из сканирующих лазеров (лидар имеет линейку из 32 вертикально расположенных лазеров). Таким образом, при перемещении платформы по ровной поверхности координаты данных точек не меняются, ввиду чего они не несут полезной информации. В реальных условиях поверхность перемещения не является идеально ровной, однако ввиду того, что в данной работе рассматривается использование лазерного сканера на наземной платформе, её вертикальное перемещение очень мало и определяется небольшими колебаниями подвески автомобиля при перемещении и неровностями дороги. Таким образом, можно заключить, что поверхность перемещения и параллельные ей плоскости содержат малоинформативные точки, которые необходимо удалить. Для выполнения данной задачи имеются два основных способа: простое отсечение точек по уровню и нахождение модели плоскости с последующим определением удовлетворяющих ей точек. Первый вариант достаточно прост и предполагает задание вертикального порога h , и если $m_{i_z} < h$, то эта точка удаляется как относящаяся к поверхности земли. Второй вариант предполагает использование метода для нахождения модели плоскости земли, такого, как, например, *RANSAC* (*RANdomSampleConsensus*) [10]. Найденная модель плоскости $ax + by + cz + d = 0$, где a, b, c, d – постоянные параметры, x, y, z – координаты в трёхмерном пространстве, сопоставляется по каждому из параметров с некоторыми порогами h_a, h_b, h_c, h_d , и в случае удовлетворения заданным критериям все входящие в данную модель точки скана удаляются. Кроме этого, возможно введение порога для размера плоскости h_s , определяющего минимальное число точек, удовлетворяющих найденной модели. Такой подход более точен при удалении неинформативных точек, однако и более ресурсоёмок.

Следующим направлением удаления неинформативных точек является фильтрация по расстоянию их расположения от платформы. Лидар *Velodyne HDL-32E* возвращает информацию об

объектах, располагающихся на расстоянии до 100 м, однако очевидно, что чем дальше располагается объект, тем меньшее количество точек будет на него приходиться при прочих равных условиях. Кроме того, при передвижении платформы во время сканирования смещение точек прямо пропорционально дистанции их расположения от лазерного сканера. Поэтому имеет смысл введение некоторого порога h_r и отсеечение всех точек, располагающихся дальше этого порога: $\sqrt{m_{i_x}^2 + m_{i_y}^2 + m_{i_z}^2} > h_r$, где $m_{i_x}, m_{i_y}, m_{i_z}$ – координаты точек в трёхмерном пространстве. Такой подход особенно сокращает количество требуемых ресурсов при использовании в мультискановом *ICP*.

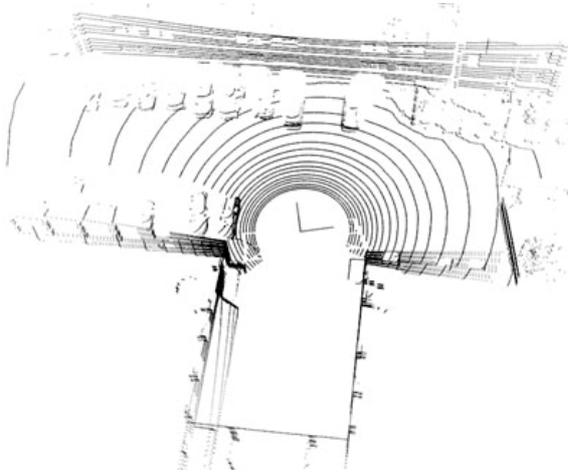


Рисунок 4 – Одиночный скан с лидара Velodyne HDL-32E

Относительно низкое разрешение лазерных сканеров очень часто приводит к тому, что на получаемых сканах иногда проявляются одиночные точки или небольшие их группы, которые относятся к мелким объектам. Ввиду того, что данные объекты отображаются на сканах непостоянно, относящиеся к ним точки также в большинстве случаев являются малоинформативными. Одним из способов их удаления является использование статистического фильтра [7]. Пусть $Mean_{K_i}$ – среднее расстояние от точки m_i до K её ближайших соседей

$$Mean_{K_i} = \frac{1}{K} \times \sum_{j=1}^K \sqrt{(m_{i_x} - m_{j_x})^2 + (m_{i_y} - m_{j_y})^2 + (m_{i_z} - m_{j_z})^2} = (7)$$

$$= \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K r_{i,j},$$

где $r_{i,j}$ – евклидово расстояние от i -й до j -й точки. Вводя коэффициент k_{pr} , определяем по-

рог $h_{pr_i} = Mean_{K_i} \cdot k_{pr}$, при этом все j -е точки, для которых $r_{i,j} > h_{pr_i}$, удаляются.

Экспериментальная часть. Как было отмечено выше, исследования проводились с использованием данных, полученных с лидара Velodyne HDL-32E, установленного на автомобиле-роботе при перемещении по территории кампуса РГПТУ. Используемый лидар имеет в своём составе, кроме трёхмерного лазерного сканера, также модули гироскопа и GPS. Информация с этих сенсоров намеренно не использовалась, поскольку в данной работе стояла цель оценить методы обработки трёхмерных лазерных сканов и построения карт на их основе.

При анализе сопоставления трёхмерных лазерных сканов встаёт вопрос о критерии оценки качества сопоставления. Визуальная оценка полученных карт не является приемлемой, поскольку практически не позволяет сравнивать те или иные методы обработки данных. Ряд подходов рассмотрен в работе [8], в их числе использование так называемых опорных (эталонных) данных, получаемых за счёт сопоставления полученных сканов с имеющимися данными картографических служб. Такой подход достаточно эффективен, однако, не всегда применим на практике ввиду отсутствия подобных опорных карт, что неприменимо для нашего случая. Другой подход более универсален, он предполагает использование замкнутых траекторий, где осуществляется анализ сходимости начальной и конечной точек. Для реализации этого подхода на поверхности дороги было нарисовано условное обозначение начальной точки маршрута, которая являлась одновременно и конечной его точкой (рисунок 5). Водитель автомобиля визуально совершает наезд на обозначение в конечной точке маршрута, при этом ошибка позиционирования составляет не более 0,15 м. Критерий расстояния между точками старта и финиша SF вычисляется как евклидово расстояние между начальной и конечной точками маршрута.

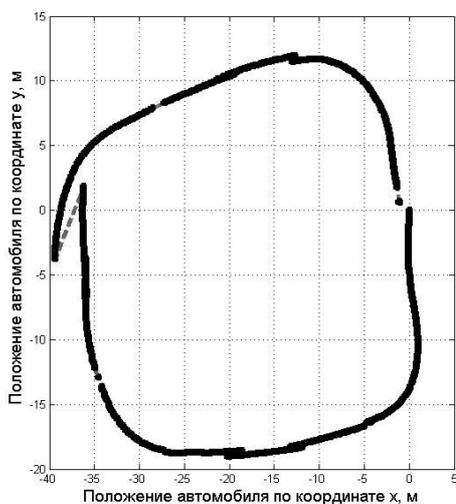


Рисунок – 5 Визуальная отметка для обозначения начала и конца траектории

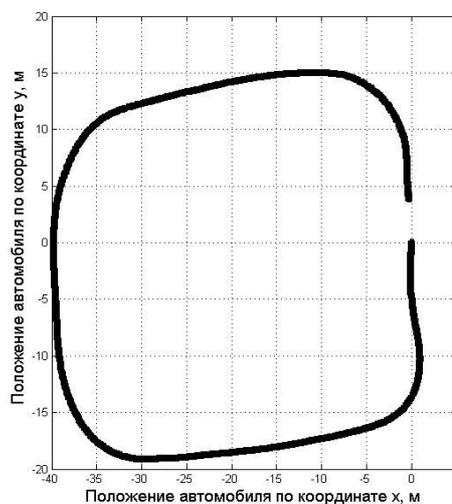
Особенностью замкнутых траекторий, по которым осуществляет перемещение автомобиль-робот, является невозможность с любой

точки маршрута наблюдать абсолютно все остальные его точки ввиду имеющихся на пути препятствий в виде зданий или растительности.

Это усложняет задачу для алгоритма, не позволяя ему использовать один или несколько универсальных ориентиров.



а



б

Рисунок 6 – Траектории перемещения робототехнической платформы, полученные при разных параметрах алгоритма: (а) – траектория с приемлемым показателем расстояния между точками старта и финиша и неудовлетворительной дисперсией дистанции перемещения; (б) – траектория с неприемлемым показателем расстояния между точками старта и финиша и приемлемой дисперсией дистанции перемещения

Использование расстояния между начальной и конечной точками при перемещении по замкнутым траекториям в качестве критерия сопоставления является эффективным и во многих случаях позволяет обнаружить ошибки, в частности, накапливающуюся ошибку перемещения. Однако не исключён случай, при котором появляющиеся ошибки будут компенсировать друг друга, в результате чего будет получен приемлемый показатель сходимости, но при этом неудовлетворительное сопоставление на промежуточных участках траектории. На рисунке 6 приведены для сравнения две траектории, полученные на основе применения рассматриваемого алгоритма с разными параметрами. Видно, что траектория (а), имеющая лучший показатель по расстоянию между точками старта и финиша, обладает явными скачками точек траектории, что не соответствует реальному перемещению платформы.

Ввиду описанных выше причин в данной работе предлагается использовать дополнительный параметр – дисперсию дистанции перемещения Dm . Автомобиль «ГАЗель БИЗНЕС» – транспортное средство с массой около 2 т, которое в ходе эксперимента перемещается со скоростью 8 – 10 км/ч. Ввиду этого некоторые ускорения наблюдаются лишь в момент старта и торможения, в остальных случаях они минимальны.

Основываясь на этом, будем считать, что скорость автомобиля в течение 1 с постоянна, при этом лидар совершает порядка 10 – 15 вращений с получением сканов. Усредняя значения изменений положения автомобиля на основе каждых 10 сканов (скользящее окно), мы можем найти разброс получаемых значений. Чем больше данный параметр, тем хуже сопоставление сканов.



Рисунок 7 – Территория проведения эксперимента около главного здания Бизнес-инкубатора РГРТУ

Основная траектория расположена на территории вокруг главного здания Бизнес-инкубатора РГРТУ (рисунок 7). Территория имеет ровное асфальтированное покрытие с небольшим перепадом высот и прямыми углами поворота. Анализ алгоритмов обработки полученных сканов будем проводить путём последовательного поиска приемлемых значений параметров каждого из них. Основную часть исследований будем проводить на парном алгоритме

ме ИСР. В качестве основных параметров алгоритма ИСР – максимального расстояния поиска соответствий и максимального количества итераций – будем использовать значения 0,4 м и 50 соответственно [11]. Как показывают эксперименты, такие значения являются приемлемыми (рисунки 8, 9). Кроме этого, введём порог по параметру дисперсии перемещения, равный $0,015 \text{ м}^2$.

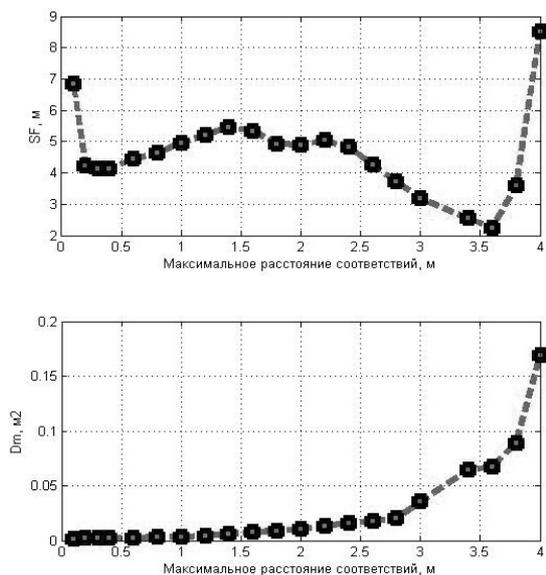


Рисунок 8 – Критерии эффективности сопоставления при варьировании максимального расстояния поиска соответствий алгоритма ИСР

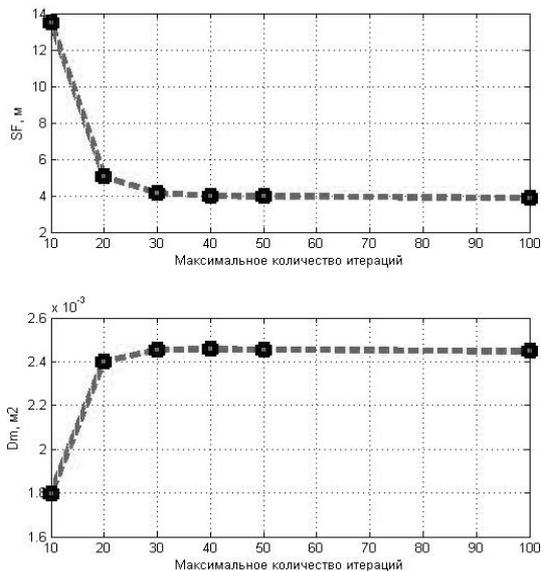


Рисунок 9 – Критерии эффективности сопоставления при варьировании максимального количества итераций алгоритма ИСР

Первым исследуемым параметром будет максимальное расстояние точек от платформы. Графики зависимостей приведены на рисунке 10. Из полученных результатов видно, что

приемлемой дистанцией расположения является значение, равное 30 м. Дисперсия перемещения меняется незначительно на всём исследуемом интервале.

Следующий исследуемый параметр – значение нижнего уровня отсечения. Графики полученных зависимостей приведены на рисунке 11. Приемлемым значением данного параметра является величина 1,8 м, хотя локальный минимум можно также наблюдать на 0,6 м. Однако ввиду меньшего количества исследуемых точек при первом параметре будем использовать это значение в будущем.

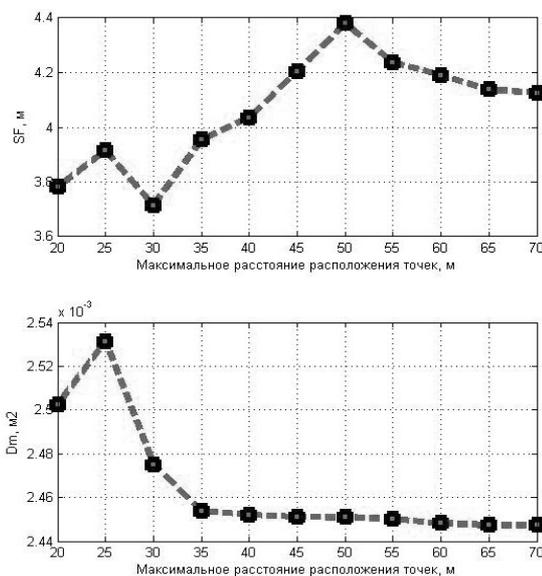


Рисунок 10 – Критерии эффективности сопоставления при варьировании максимального расстояния расположения точек на сканах

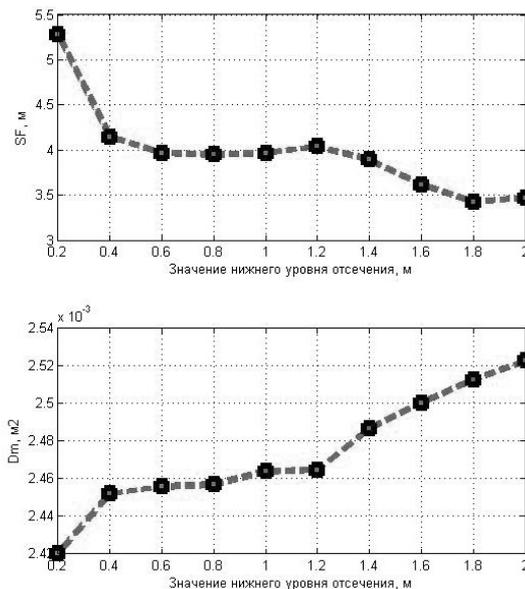
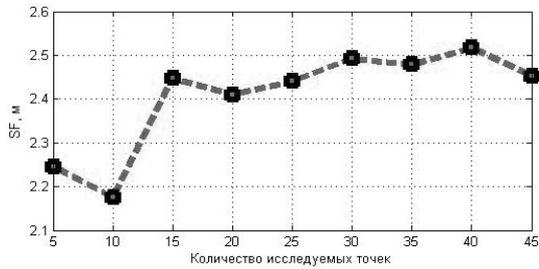


Рисунок 11 – Критерии эффективности сопоставления при варьировании нижнего уровня отсечения точек

Далее проведём исследование влияния параметров статистического фильтра. Рассматриваемый компонент имеет два основных параметра – количество исследуемых точек $Mean_K$ и коэффициент при среднем значении h_{pr} . Графики



полученных зависимостей показаны на рисунках 12 и 13. В результате полученных данных приемлемым значением параметра $Mean_K$ является 10, а h_{pr} – 0,8.

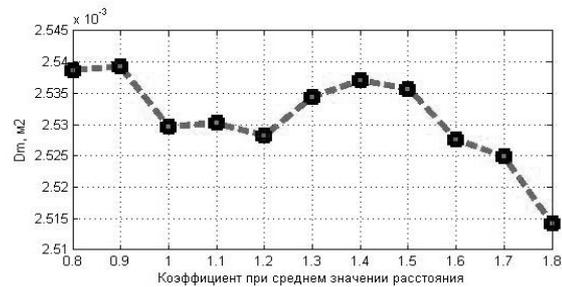
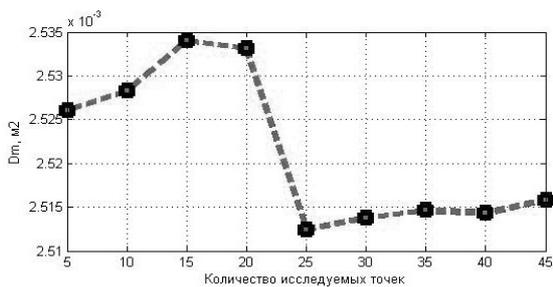
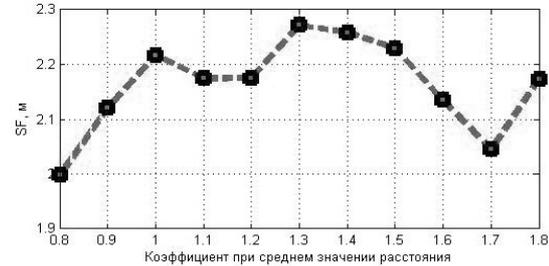


Рисунок 12 – Критерии эффективности сопоставления при варьировании количества исследуемых точек статистического фильтра

Рисунок 13 – Критерии эффективности сопоставления при варьировании коэффициента при среднем значении расстояния

Выводы и перспективы. Проведённые исследования показывают эффективность предварительной обработки полученных трёхмерных сканов при построении трёхмерных карт. Расстояние между стартовой и конечной точками как один из критериев эффективности удалось

сократить с 4,2 м до 2 м. Такая обработка не только повышает точность сопоставления, но и позволяет сократить требуемые вычислительные ресурсы, что в итоге приводит к сокращению времени вычисления. Результат сопоставления в виде трёхмерной карты показан на рисунке 14.

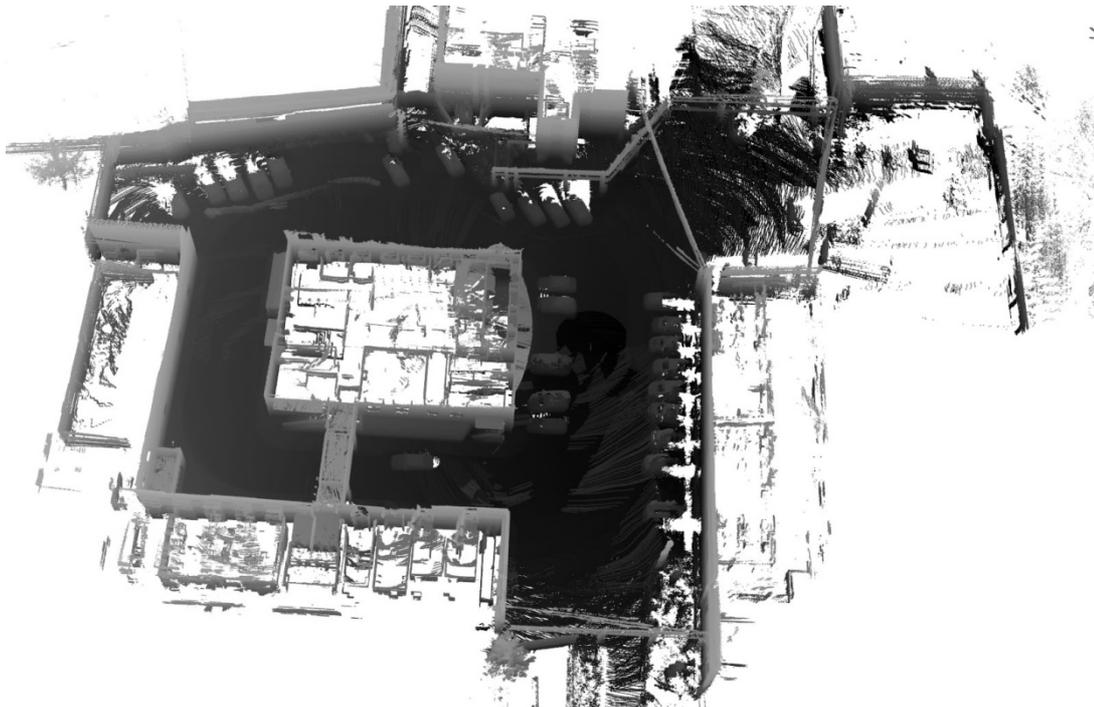


Рисунок 14 – Трёхмерная карта исследуемой территории, полученная в результате выполнения рассмотренного алгоритма

Тем не менее, остаётся задача сокращения требуемых вычислительных ресурсов для возможности выполнения сопоставления в режиме реального времени. Стоит ещё раз отметить, что в данной работе использовались только данные с лазерного сканера, что усложняет процесс сопоставления. Использование начальных приближений с других сенсоров, таких как сенсоры глобальной системы позиционирования, гироскопические сенсоры и датчики угла поворота колёс, может значительно сократить время вычисления. Кроме этого, применение вероятностных алгоритмов также позволит улучшить параметры начального приближения текущего положения.

Библиографический список

1. M. Li, W. Li, J. Wang, Q. Li, A. Nüchter. Dynamic VeloSLAM – Preliminary Report on 3D Mapping of Dynamic Environments. 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Workshop on Navigation, Perception, Accurate Positioning and Mapping for Intelligent Vehicles. Madrid, Spain, 2012.
2. P.J. Besl, N.D. Mc Kay. A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society) 14 (2), 1992, p. 239–256.
3. C. Yang, G. Medioni. Object modelling by registration of multiple range images. Image Vision Comput. (Newton, MA, USA: Butterworth-Heinemann), 1991, p. 145–155.
4. S. Rusinkiewicz, M. Levoy. Efficient Variants of the ICP Algorithm. Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001, p. 145.
5. K.S. Arun, T.S. Huang, S.D. Blostein. Least square fitting of two 3-d point sets. IEEE Transactions on PAMI, 9(5), 1987, p. 698 – 700.
6. M. Muja, D. Lowe. Fast Approximate Nearest Neighbour with Automatic Algorithm Configuration. In international Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP'09), 2007.
7. R.B. Rusu, Z.C. Marton, N. Blodow, M. Dolha, M. Beetz. Towards 3D Point Cloud Based Object Maps for Household Environments Robotics and Autonomous Systems Journal (Special Issue on Semantic Knowledge), 2008.
8. O. Wulf, A. Nüchter, J. Hertzberg, B. Wagner. Ground Truth Evaluation of Large Urban 6D SLAM. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '07), San Diego, CA, USA, October - November 2007, p. 650 – 657.
9. M. Bosse, R. Zlot. Continuous 3D scan-matching with a spinning 2D laser. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE. Kobe, Japan: IEEE Robotics and Automation Society, May 2009, p. 4312–4319.
10. M.A. Fischler, R.C. Bolles. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Comm. Of the ACM 24, 1981, p. 381–395.
11. F. Moosmann and C. Stiller. Velodyne SLAM. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Baden-Baden, Germany, 2011, p. 393-398.

УДК 004.896:621.865.8

Т.Н. Нгуен

НЕЧЁТКИЙ КОНТРОЛЛЕР ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЦЕПЛЕНИЯ И АКСЕЛЕРАЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СТАРТОМ АВТОМОБИЛЯ-РОБОТА НА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассматриваются вопросы реализации нечётких алгоритмов управления электроприводами сцепления, газа и тормоза в автомобиле-роботе при старте на горизонтальной и наклонной плоскостях.

Ключевые слова: нечёткая логика, автономная система управления, электропривод, функция принадлежности.

Введение. Исключение водителя из системы управления транспортным средством выгодно по нескольким причинам. Во-первых, автономная система управления не подвержена усталости и может функционировать круглосуточно. Во-вторых, это позволяет исключить негативное влияние на здоровье водителя. Например, при тестовых испытаниях на булыжном треке автомобилей, сошедших с конвейера завода «ГАЗ», водители подвергаются длительному вредному воздействию вибрации и тряски. В-третьих, сис-

тема автопилота в перспективе может перенять опыт лучшего стиля вождения, что может быть легко транслировано на большее количество транспортных средств, повышая тем самым безопасность движения.

Сценарий начала движения по сложности и чёткости действий является одним из самых сложных процессов. Система привода сцепления является объектом управления высокой сложности со сложной математической моделью и широким диапазоном изменения параметров. Тра-

диционные методы управления, такие как ПИД-регулятор, могут не обеспечивать требуемое качество управления. В то же время концепция нечёткого управления в настоящее время является одной из перспективнейших интеллектуальных технологий. Системы на базе нечёткой логики целесообразно применять при отсутствии информации или высокой сложности объекта управления [1], [2], [3], при этом создавая высококачественные системы управления.

В настоящей работе представлен ряд аспектов, касающихся систем управления на основе нечёткой логики для реализации сценария начала движения автомобиля-робота. Кроме того, ставится задача минимизации времени старта движения при условии обеспечения достаточно плавного включения сцепления. Это позволит повысить эффективность тестирования сцепления на отказ путем сокращения времени выполнения стандартного количества циклов старта и остановки транспортного средства.

Теоретическая часть. На рисунке 1 представлена модель привода сцепления автомобиля. Упрощённая динамическая модель трансмиссии автомобиля описана в работе [4], [5]. В данной модели можно выделить следующие компоненты: двигатель внутреннего сгорания (ДВС), привод сцепления, коробка переключения передач (КПП), привод колёс. Существует два основных типа автомобильного сцепления: «сухое» и «мокрое». При использовании «мокрого» сцепления фрикционные диски погружены в масло и им же приводятся в действие, в то время как в «сухом» сцеплении масло отсутствует. В «сухом» сцеплении привод является, как правило, механическим.

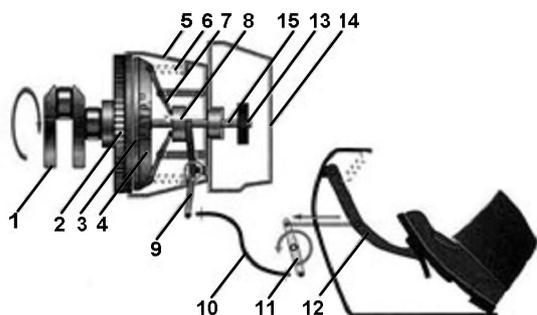


Рисунок 1 – Схема механического привода подключения сцепления: 1 – коленчатый вал; 2 – маховик; 3 – ведомый диск; 4 – нажимной диск; 5 – кожух сцепления; 6 – нажимные пружины; 7 – отжимные рычаги; 8 – подшипник выключения сцепления; 9 – вилка выключения сцепления; 10 – металлический трос; 11 – рычаг привода; 12 – педаль сцепления; 13 – шестерня первичного вала; 14 – катер КПП; 15 – первичный вал КПП

Пусть T_e, T_{cl} – крутящие моменты двигателя и ведущего диска сцепления соответственно,

T_l – крутящий момент нагрузки, $T_{driving}$ – моментсопротивления вращению, J_e – момент инерции вала ДВС, J_c – момент инерции ведущего вала сцепления, J_2 – момент инерции вала КПП, J_3 – момент инерции ведущих колёс, J_v – момент инерции автомобиля; F_n – сила трения, направленная по нормали, с которой воздействуют друг на друга диски сцепления, k_1 и k_2 – коэффициенты жёсткости торсионных соединений, i – передаточное число КПП, b – коэффициент силы трения между колёсами и дорогой, определяющийся как сила линейного торможения. Опишем сцепление математически [5], [6], выразив T_{cl} с использованием модели трения Кулона

$$T_{cl} = F_n \mu R_a \text{sign}(\varphi'_e - \varphi'_c), \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения, R_a – приведённый радиус активной поверхности сцепления, φ' – первая производная по времени соответствующего параметра φ , φ_e – угловое положение вала ДВС, φ_c – угловое положение ведущей пластины сцепления.

В случае когда сцепление передаёт максимальную величину крутящего момента, выражение может быть записано в виде

$$T_{cl\max} = F_{n\max} N \mu R_a \text{sign}(\varphi_e - \varphi_c), \quad (2)$$

где N – количество используемых дисков сцепления.

Объединяя вышеописанные элементы, получаем динамическую модель трансмиссии (рисунок 2). ДВС развивает на валу с моментом инерции J_e крутящий момент T_e , при этом ω_e – угловая скорость вращения вала, а φ_e – его угловое положение. Крутящий момент вала двигателя передаётся по оси, которую будем считать абсолютно упругой, наведомый диск сцепления. T_{cl} – переданный крутящий момент посредством пластины из фрикционного материала, имеющей момент инерции J_c и угловое положение φ_c . Торсионное соединение, обладающее коэффициентом жёсткости k_1 , подключает сцепление к КПП, первичный вал которой обладает моментом инерции J_2 и угловым положением φ_2 . Жёсткость остальной части трансмиссии, в которую входят приводные валы, учтена в коэффициенте k_2 . Сила сопротивления вращению $F_{rdriving}$ воздействует на ведущие колёса ав-

томобилей, обладающие моментом инерции J_3 , угловым положением φ_3 и радиусом R_w . Кру-

тящий момент колеса T_w определяется как

$$T_w = k_2(i\varphi_2 - \varphi_3). \quad (3)$$

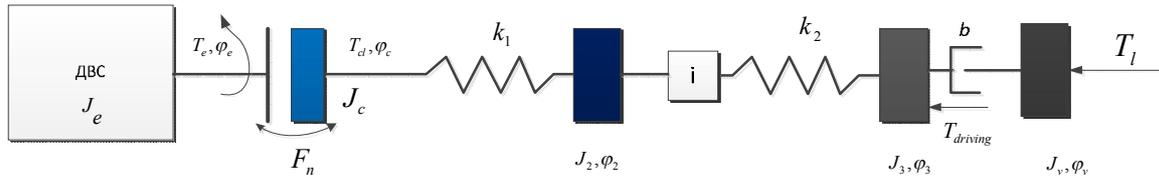


Рисунок 2 – Расчетная динамическая модель трансмиссии автомобиля с фрикционным сцеплением

Момент инерции автомобиля проецируется на величину J_v , при этом вводится соответствующий параметр углового положения φ_v , а крутящий момент, вызванный сопротивлением вращению колёс, обозначается как T_l . Сила трения между колёсами и дорогой учитывается как сила линейного торможения с коэффициентом b . Для данной системы уравнения движения можно описать как [7],[8]:

$$J_e \varphi_e'' = T_e - T_{cl}, \quad (4)$$

$$J_c \varphi_c'' = T_{cl} - k_1(\varphi_c - \varphi_2), \quad (5)$$

$$J_2 \varphi_2'' = k_1(\varphi_c - \varphi_2) - ik_2(i\varphi_2 - \varphi_3), \quad (6)$$

$$J_3 \varphi_3'' = k_2(i\varphi_2 - \varphi_3) - b(\varphi_3' - \varphi_v') - F_{driving} R_w, \quad (7)$$

$$J_v \varphi_v'' = b(\varphi_3' - \varphi_v') - T_l. \quad (8)$$

Реализация и идентификация параметров описанной динамической модели трансмиссии в составе автономной системы управления транспортного средства «ГАЗель БИЗНЕС» вызвали ряд затруднений ввиду значительной нестационарности и сложности измерений некоторых величин. Поэтому рассмотренная модель была

обобщена с использованием математического аппарата нечёткой логики.

Рассмотрим структурные схемы системы для случая старта на ровной поверхности без использования акселерации и для случая старта на наклонной поверхности с использованием педали газа. На рисунке 3 показана модель управления автомобилем при старте без использования педали газа. Интерфейс привод-компьютер-человек был создан на языке LabView. Он включает в себя программу управления платой универсального силового контроллера (УСК, разработка СКБ РГРТУ) и измерения параметров автомобиля. Измеренные параметры, полученные с использованием протокола K-line и платы УСК, выводятся на экран монитора компьютера. Программирование УСК реализует нечёткий регулятор для управления исполнительными электродвигателями постоянного тока приводов педали сцепления, тормоза и газа. Угол поворота вала электродвигателя и скорость его вращения определяются по оптическому энкодеру.

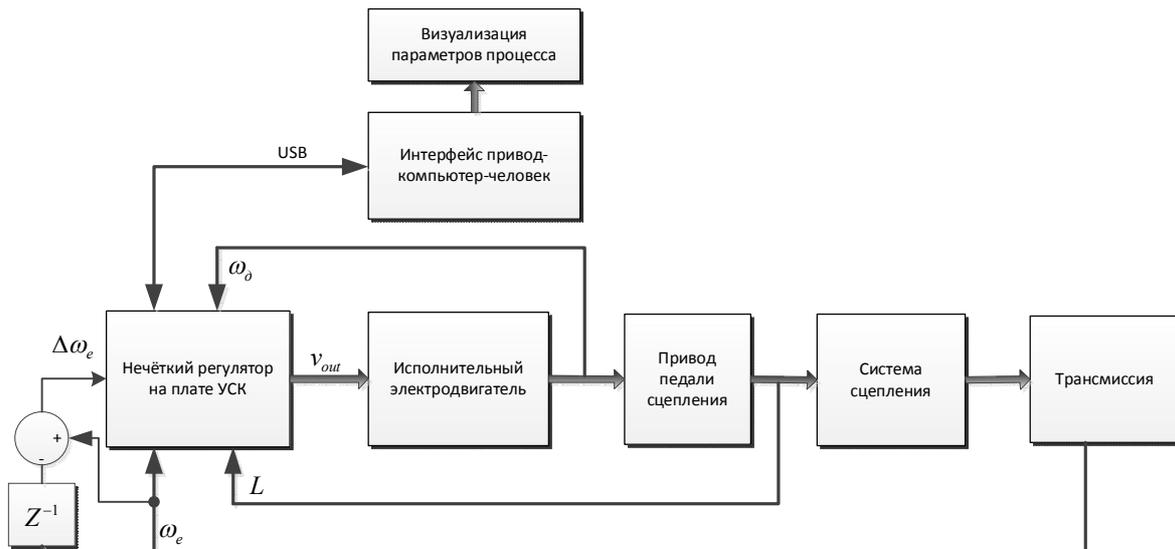


Рисунок 3 – Функциональная схема системы управления автомобилем без использования акселерации: ω_e – угловая скорость вращения вала ДВС; ω_o – угловая скорость вращения вала электромеханического привода педали сцепления; v_{out} – скорость вращения вала электромеханического привода педали сцепления; L – перемещение педали сцепления

Для сценария старта на наклонной поверхности возникает необходимость использования двухуровневой нечёткой системы управления (рисунок 4). Задача системы первого уровня состоит в формировании значений коэффициентов при параметрах угловой скорости ω_e и приращении угловой скорости $\Delta\omega_e$ вращения вала ДВС (которое фактически является угловым ускорением), передающихся системе второго уровня. Формирование коэффициентов осуществляется на основе данных о массе автомобиля (которая оценивается на основе датчика силы на задней подвеске автомобиля) и угле наклона плоскости старта (определяется по интеграль-

ному гироскопу). Данные коэффициенты фактически обеспечивают изменение области определения функции принадлежности для параметров ω_e и $\Delta\omega_e$. Система второго уровня, в свою очередь, на основе полученных значений осуществляет управление исполнительными электродвигателями для реализации старта. Главное отличие нечёткого регулятора второго уровня, входящего в состав второй системы, от нечёткого регулятора первой системы заключается в использовании педали газа, для чего возникает необходимость дополнительного канала управления (рисунок 5).

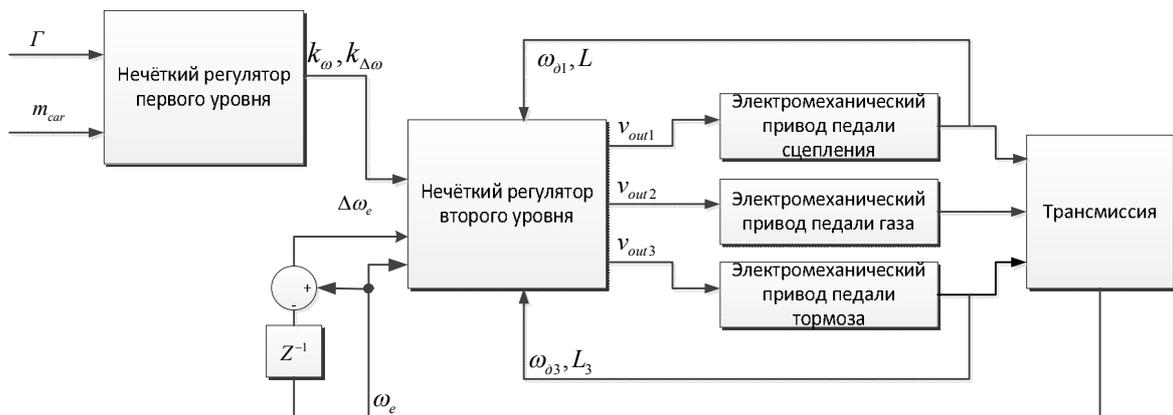


Рисунок 4 – Структурная схема системы управления автомобиля для сценария старта на наклонной плоскости: Γ – угол наклона поверхности старта; m_{car} – масса автомобиля, k_{ω} – коэффициент при уставном значении угловой скорости вращения вала ДВС, $k_{\Delta\omega}$ – коэффициент при приращении угловой скорости вращения вала ДВС; v_{out1} , v_{out2} , v_{out3} – скорости вращения валов электромеханических приводов педалей сцепления, газа и тормоза соответственно; ω_e – угловая скорость вращения вала ДВС; ω_{01} , ω_{03} – угловые скорости вращения валов электромеханических приводов педалей сцепления и тормоза соответственно; L , L_3 – перемещение педалей сцепления и тормоза

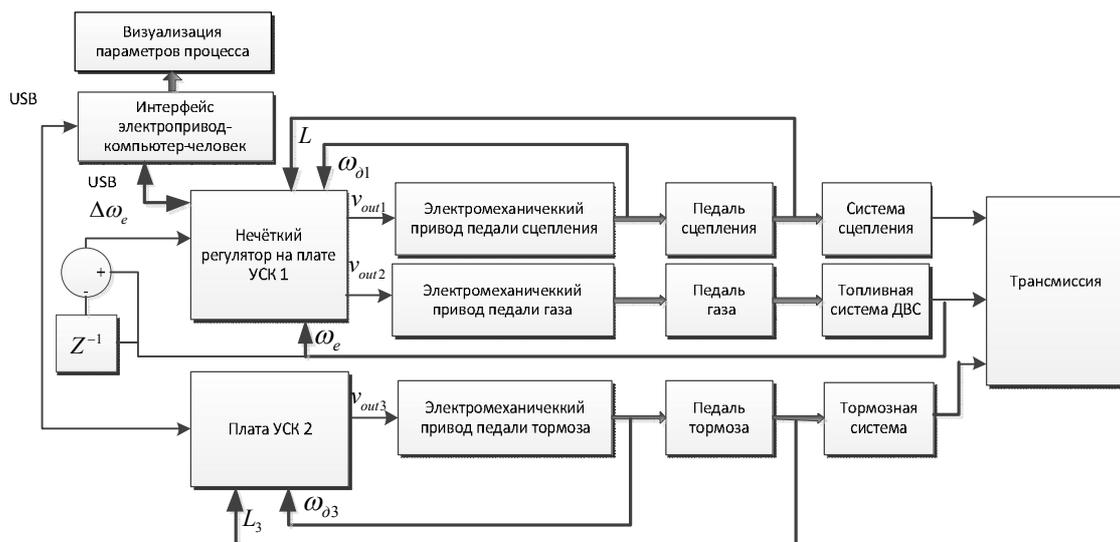


Рисунок 5 – Функциональная схема системы управления автомобиля с использованием акселерации: v_{out1} , v_{out2} , v_{out3} – скорости вращения валов электромеханических приводов педалей сцепления, газа и тормоза соответственно; ω_e – угловая скорость вращения вала ДВС; ω_{01} , ω_{03} – угловые скорости вращения валов электромеханических приводов педалей сцепления и тормоза соответственно; L , L_3 – перемещение педалей сцепления и тормоза

Рассмотрим теперь реализацию нечёткого регулятора для случая старта на ровной поверхности. Для нечетких множеств существует общепринятая система обозначений [1]: N – отрицательный (*Negative*), Z – нулевой (*Zero*), P – положительный (*Positive*); к этим обозначениям добавляют модификаторы: S – малый (*Small*), M – средний (*Medium*), B – большой (*Big*). Например, NB – отрицательный большой; NM – отрицательный средний; PL – положительный большой. На рисунке 6 представлены графики функции принадлежности.

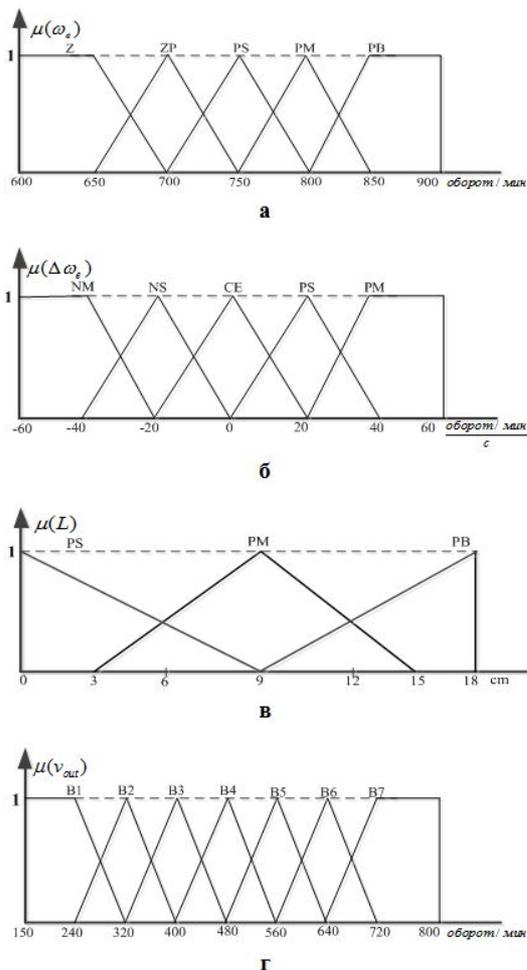


Рисунок 6 – Графики функции принадлежности для нечёткого регулятора управления сцеплением: а – входная переменная уставного значения угловой скорости вращения вала ДВС; б – входная переменная приращения угловой скорости вращения вала ДВС; в – входная переменная перемещения педали сцепления; г – выходная переменная угловой скорости исполнительного двигателя педали сцепления

В настоящей работе предлагается использовать алгоритм нечёткого вывода Мамдани. Всего используются 75 правил нечётких продукций вида:

ПРАВИЛО: ЕСЛИ " ω_e есть A и $\Delta\omega_e$ есть B и L есть C ", ТО " v_{out} есть E ", где ω_e , $\Delta\omega_e$, L – нечёткие входные переменные, v_{out} – выходная

переменная, A , B , C , E – некоторые заданные функции принадлежности.

Для выполнения численных расчетов на этапе дефаззификации может быть использован метод нахождения центра тяжести или центроида площади [3], который рассчитывается по формуле:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)}, \quad (9)$$

где y – выходная переменная, результат дефаззификации; x – выходная лингвистическая переменная; $\mu(x)$ – функция принадлежности нечёткого множества, соответствующего выходной переменной.

Построение нечёткой системы осуществлялось с использованием пакета прикладных программ *Matlab* с набором инструментов *Fuzzy Logic Toolbox* [1], [3]. На рисунке 7 показана выходная поверхность для нечёткой модели.

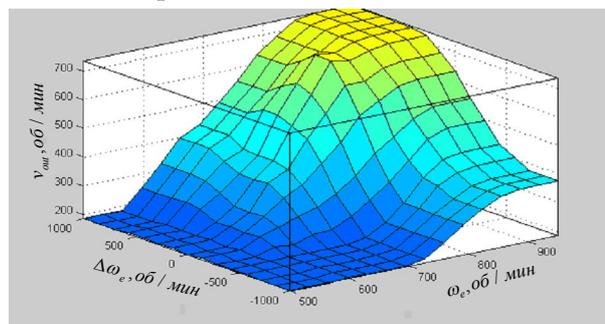


Рисунок 7 – График поверхности выходной функции нечёткого регулятора

Рассмотрим построение нечёткого регулятора для сценария старта с наклонной поверхности. Графики функции принадлежности для нечёткого регулятора первого и второго уровня представлены на рисунках 8 и 9, соответственно. Здесь также используется алгоритм нечёткого вывода Мамдани [1], [9], поэтому правила нечётких продукций будут образованы на основе следующих схем.

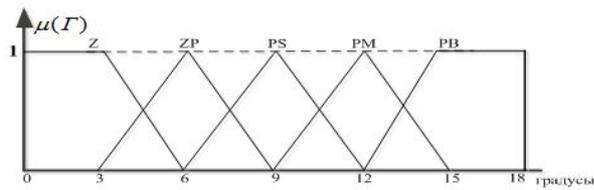
1. Для нечёткой системы первого уровня

ЕСЛИ " Γ есть Γ и m_{car} есть M ", ТО " k_1 есть K_1 и k_2 есть K_2 ", где Γ , m_{car} – нечёткие входные переменные, k_1, k_2 – выходные переменные, Γ , M , K_1, K_2 – некоторые заданные функции принадлежности.

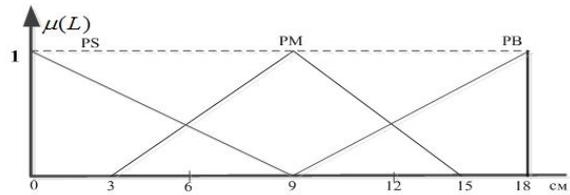
2. Для нечёткой системы второго уровня

ЕСЛИ " ω_e есть A и $\Delta\omega_e$ есть B и L есть C ", ТО " v_{out1} есть E и v_{out2} есть F ".

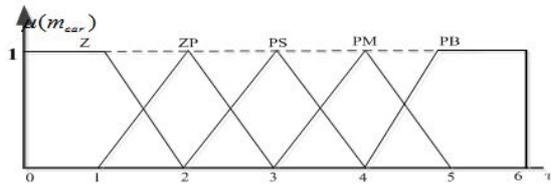
Где ω_e , $\Delta\omega_e$, L – входные нечёткие переменные, v_{out1}, v_{out2} – выходные переменные, A , B , C , E , F – некоторые заданные функции принадлежности.



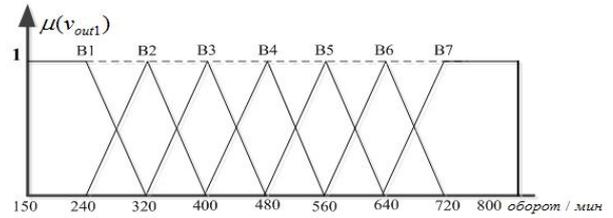
а



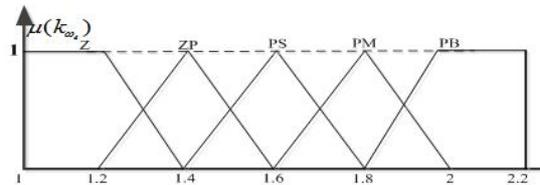
б



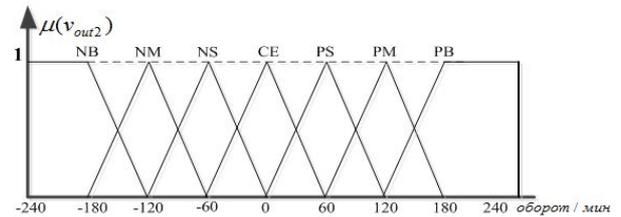
в



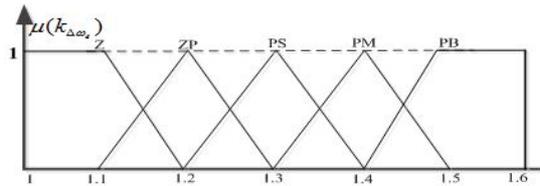
г



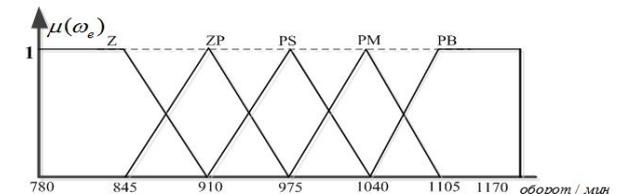
д



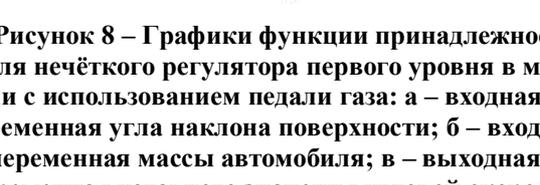
е



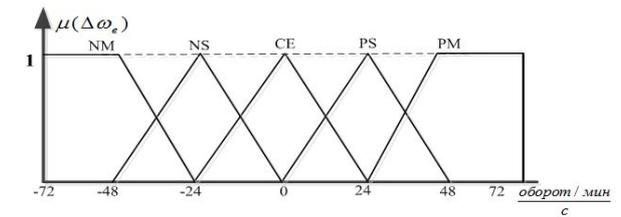
ж



з

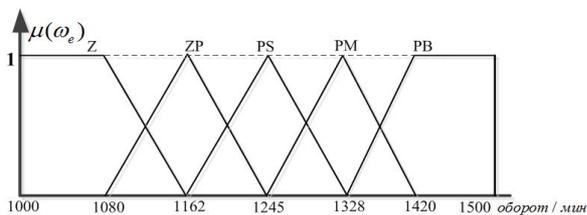


и

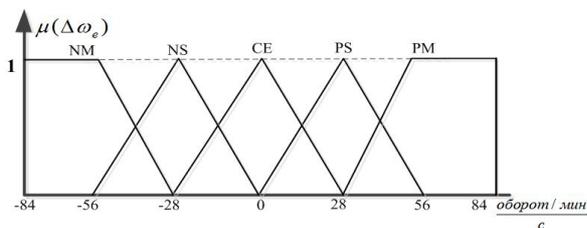


к

Рисунок 8 – Графики функции принадлежности для нечёткого регулятора первого уровня в модели с использованием педали газа: а – входная переменная угла наклона поверхности; б – входная переменная массы автомобиля; в – выходная переменная уставного значения угловой скорости вращения вала ДВС; г – выходная переменная приращения угловой скорости вращения вала ДВС



а



б

Рисунок 9 – Графики функции принадлежности для нечёткого регулятора второго уровня в модели с использованием педали газа: а – входная переменная уставного значения угловой скорости вращения вала ДВС; б – входная переменная приращения угловой скорости вращения вала ДВС; в – входная переменная перемещения педали сцепления; г – выходная переменная угловой скорости вращения исполнительного двигателя привода педали сцепления; д – выходная переменная угловой скорости вращения исполнительного двигателя привода педали газа; е – пример расширения и сдвига области определения функции принадлежности для ω_e с использованием коэффициента $k_{\omega_e} = 1,3$; ж – пример расширения области определения функции принадлежности для $\Delta\omega_e$ с использованием коэффициента $k_{\Delta\omega_e} = 1,2$

Процесс дефазификации осуществляется аналогично предыдущему сценарию с использованием формулы (9). Выходная поверхность для нечёткой системы в системе *Matlab* показана на рисунке 10.

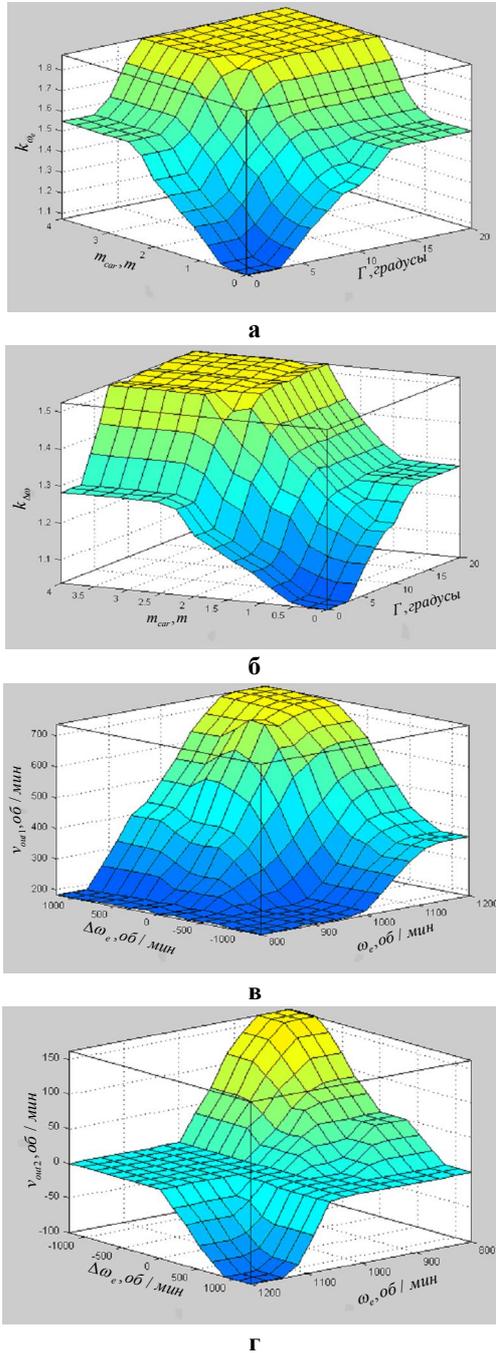
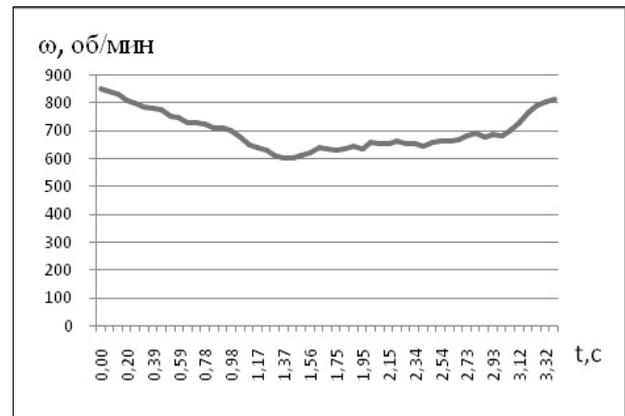
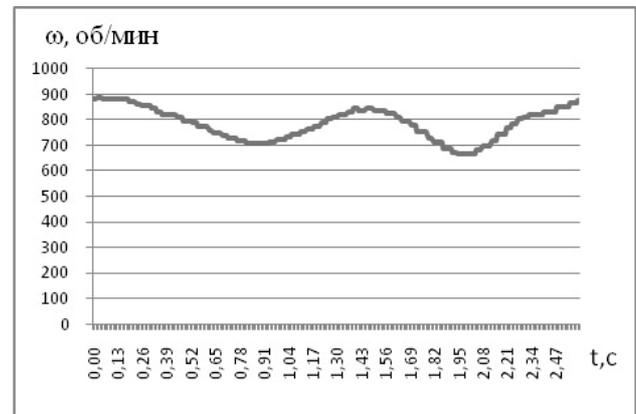


Рисунок 10 – Графики поверхностей выходных функций нечётких регуляторов для различных углов наклона поверхности старта: а – коэффициент изменения области определения функции принадлежности для параметра ω_e ; б – коэффициент изменения области определения функции принадлежности для параметра $\Delta\omega_e$; в – угловая скорость вращения вала электромеханического привода педали сцепления; г – угловая скорость вращения вала электромеханического привода педали газа.

Экспериментальная часть. Исследования разработанных алгоритмов проводились на автомобиле-роботе «ГАЗель БИЗНЕС» СКБ РГРТУ. В ходе исследований были проведены три эксперимента: старт на ровной поверхности без использования педали газа, старт на поверхности с углом наклона 10° с использованием педали газа и старт на поверхности с углом наклона 15° также с использованием педали газа. В ходе каждого эксперимента осуществлялся сбор значений угловой скорости вращения вала ДВС, изменявшихся в процессе старта автомобиля.



а



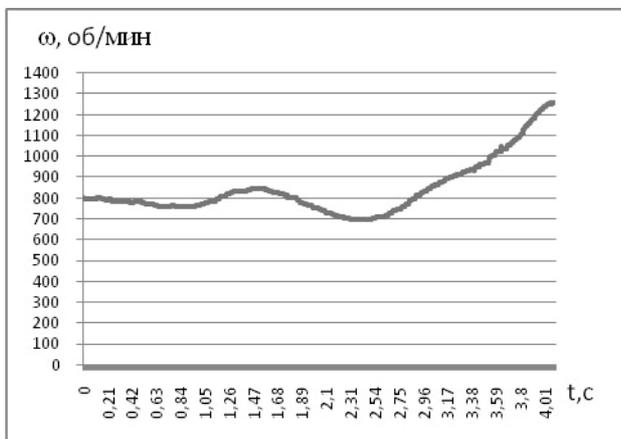
б

Рисунок 11 – Графики изменения угловой скорости вращения вала ДВС при старте с ровной поверхности без использования педали газа:

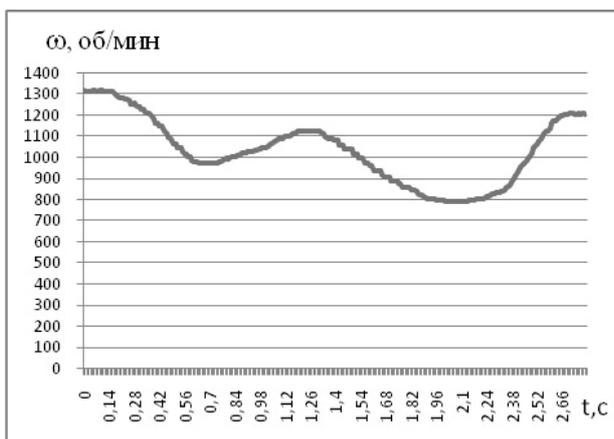
а – автомобиль под управлением человека;
б – автомобиль под управлением нечёткого регулятора

Графики изменения угловой скорости вращения вала ДВС для первого эксперимента показаны на рисунке 11. На графике (а) в момент времени $T_{ВК} = 3,8$ с происходит резкое включение сцепления, в результате чего наблюдается падение угловой скорости вращения вала, равное $\omega_{\max} - \omega_{\min} = 860 - 600 = 260$ оборот/мин, вызванное действием момента сопротивления со стороны ведомого вала. На графике (б) включение сцепления происходит в момент времени

$T_{BK} = 2,52$ с, падение угловой скорости составляет $\omega_{\max} - \omega_{\min} = 892 - 660 = 232$ оборот/мин. По результатам можно сделать вывод, что как водитель, так и система управления на базе нечёткого регулятора обеспечивают комфортный старт автомобиля.



а



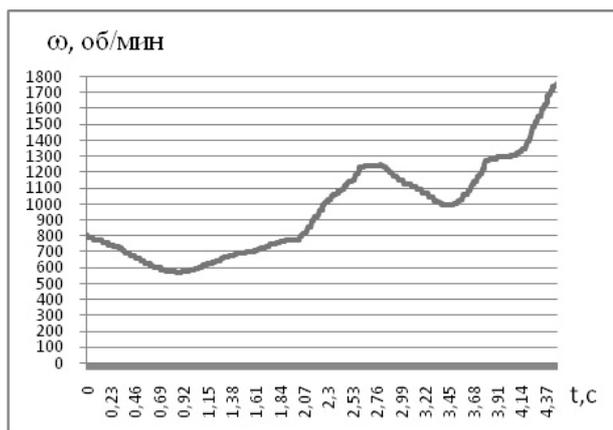
б

Рисунок 12 – Графики изменения угловой скорости вращения вала ДВС при старте на поверхности с углом наклона 10° с использованием педали газа: а – автомобиль под управлением человека; б – автомобиль под управлением нечёткого регулятора

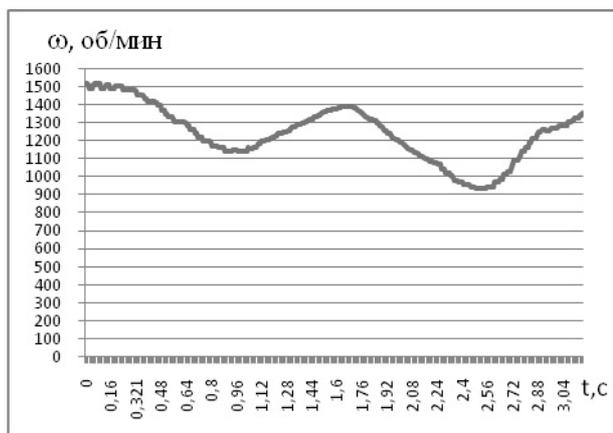
Графики изменения угловой скорости вращения вала ДВС для второго эксперимента показаны на рисунке 12. На графике (а) в момент времени $T_{BK} = 4,02$ с происходит резкое включение сцепления и падение угловой скорости вращения вала $\omega_{\max} - \omega_{\min} = 1270 - 700 = 570$ оборот/мин, вызванное действием момента сопротивления со стороны ведомого вала. В момент времени $T_{BK} = 2,66$ с происходит резкое включение сцепления и падение угловой скорости вращения ведущего вала $\omega_{\max} - \omega_{\min} = 1300 - 800 = 500$ оборот/мин [график (б)]. По результатам эксперимента можно отметить, что как водитель, так регулятор на основе нечёткой логики

обеспечивают комфортный старт, при этом интервал времени выполнения старта у нечёткого регулятора меньше.

Графики изменения угловой скорости вращения вала ДВС для третьего эксперимента показаны на рисунке 13. На графике (а) в момент времени $T_{BK} = 4,37$ с происходит резкое подключение сцепления и падение угловой скорости вращения ведущего вала до $\omega_{\max} - \omega_{\min} = 1760 - 800 = 960$ оборот/мин, вызванное действием момента сопротивления со стороны ведомого вала. На графике (б) подключение сцепления происходит в момент времени $T_{BK} = 3,04$ с, угловая скорость вращения вала падает на $\omega_{\max} - \omega_{\min} = 1500 - 960 = 540$ оборот/мин. Данные результаты аналогичны предыдущему эксперименту, здесь также обеспечивается комфортный старт автомобиля как под управлением водителя, так и под управлением системы на базе нечёткой логики, при этом последняя выполняет старт быстрее.



а



б

Рисунок 13 – Графики изменения угловой скорости вращения вала ДВС при старте на поверхности с углом наклона 15° с использованием педали газа: а – автомобиль под управлением человека; б – автомобиль под управлением нечёткого регулятора

Выводы. Грубая реализация сценария начала движения автомобиля на основе алгоритма ПИД-управления выявила невозможность этого подхода обеспечить приемлемо малое время старта ввиду недостаточной адекватности модели, основанной на предположении о линейном характере зависимости входных и выходных переменных процесса управления. Нелинейность и нестационарность процесса, сложность построения и идентификации его модели традиционными методами, основанными, например, на дифференциальных уравнениях, а также тот факт, что водитель гораздо лучше «чувствует» автомобиль и в разы быстрее осуществляет начало движения, нежели чем ПИД-контроллер, привели к выбору математического аппарата нечеткой логики для построения автономной системы управления стартом транспортного средства. Эта технология позволила формализовать невербальный опыт водителя и реализовать его в нечетком контроллере управления сцеплением и акселерацией. Эксперименты, проведенные на автомобиле-роботе «ГАЗель БИЗНЕС», разработанным в СКБ РГРТУ, подтвердили приемлемую

для стандартного тестирования реализацию сценария начала движения транспортного средства, которое выполняется за квазиоптимальный интервал времени.

Библиографический список.

1. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. 2005.
2. Feng G. Analysis and Synthesis of Fuzzy Control Systems, 2010.
3. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления, 2008.
4. Zanasi R. Dynamic modelling and Control of a Car Transmission System, 2001.
5. Waj-Fraj A., Pfeiffer F. Optimal control of gear shift operations in automatic transmissions. 2001.
6. Centea D., Rahnejat H., Munday M.T. The influence of the interface coefficient of friction upon the propensity to judder in automotive clutches.
7. Анохин В.И. Отечественные автомобили. М.: Машиностроение, 1977. 592с.
8. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля. – ВНУ, 2006. 478с.
9. Егунова Н.Д. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. МГТУ, 2002.

УДК 621.865.8

А.Г. Борисов, С.А. Голь, В.Е. Корнеев

ОТКРЫТАЯ АППАРАТНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОМОБИЛЯ

Описанию робототехнической платформы, обладающей габаритными размерами легковой машины класса В, оснащенной развитой бортовой информационно-измерительной системой с документированным логическим уровнем интерфейса. Платформа предназначена для тестирования программных решений автопилота автомобиля-робота.

Ключевые слова: автопилот, автомобиль-робот, бортовая ИИС, открытая аппаратная платформа, мотор-редуктор.

Введение. Полноценный автомобиль-робот, безоговорочно соблюдающий правила дорожного движения, безопасно и виртуозно выполняющий маневры, превосходя возможности водителя-профессионала в любой неопределенной изменяющейся среде: от плотного трафика мегаполисов до пересеченной местности – это сегодня объект фантастики, прогнозы появления которого сильно разнятся: от 10 до 50 лет. Уровень развития и скорость реакции современных исполнительных систем, разнообразие сенсоров и их впечатляющие характеристики существенно превосходят человеческие возможности. Однако несмотря на достигнутую вычислительную

мощность современных компьютеров, математический аппарат распознавания образов, локализации, навигации, позиционирования транспортных средств существенно отстает от возможностей, которые, к примеру, демонстрирует цирковой медведь на велосипеде. Несмотря на завышенные, в основном благодаря СМИ, ожидания, ряд юридических и эксплуатационных проблем, обсуждаемых в гуманитарной сфере, растущая конкуренция на пути создания автомобиля-робота, в высшей степени проявляемая, например, на различных престижных соревнованиях, уже многократно окупает затраты благодаря появлению интеллектуальных сервисов-

ассистентов водителя, систем автопарковки, а там где среда хорошо структурирована – и полнотью автономных роботов: грузоперевозчиков промышленных зон, метро, карьерных самосвалов и т.д.

Анализ исследовательского сообщества в области автономного управления транспортными средствами показывает наличие большого числа компаний и коллективов разработчиков (в т.ч. и в нашей стране), которые, исчерпав возможности компьютерного моделирования, испытывают необходимость отладки своих программных решений в реальных условиях, т.е. на базе автомобиля со встроенным спец. оборудованием, состав которого, что особенно касается самой дорогостоящей его части – измерительной, вполне определен и устоялся. Сформировавшийся спрос не находит адекватного предложения ввиду большой стоимости одного экспериментального заезда; большинство прототипов автомобилей-роботов существуют в единственном экземпляре и не предполагают использование сторонних программных решений в силу отсутствия стандартного открытого и хорошо документированного интерфейса и сервисного программного обеспечения для анализа данных, получаемых во время заезда.

Тестирование автономных транспортных средств в реальных условиях, как уже было отмечено, очень дорого, затратно по времени и усилиям. Кроме того, если испытание пошло не по сценарию, это может привести к серьезному ущербу, в том числе к травмам людей. Переход к стадии полевых испытаний для большинства коллективов разработчиков программного обеспечения (ПО) автопилота затруднен ввиду отсутствия на рынке удовлетворяющего сформировавшимся запросам профессионального инструментария для поддержки исследований ПО автопилота на конечных стадиях развития. Эта стадия характеризуется тем, что ПО еще не достигло степени отладки для развертывания его на автомобиле-роботе и требует промежуточных полевых испытаний.

Цель работы:

- анализ и классификация существующих на сегодняшний день мобильных платформ;
- разработка легкого, переносимого, быстросборного, обладающего габаритными размерами автомобиля класса В прототипа мобильной платформы, устойчивого к многочисленным столкновениям;
- формирование структуры бортовой информационно-управляющей системы, пригодной для быстрой отладки ПО робота-автомобиля.

Теоретическая часть. В современной робототехнике мобильным роботом принято называть автоматическое устройство, способное к движению в некоторой среде и не привязанное к заданному физическому местоположению.

Мобильные роботы востребованы в промышленности, вооруженных силах, в зонах природных и техногенных катастроф. В последние годы мобильные роботы проникают и на потребительский рынок в виде бытовой техники (пылесосы, газонокосилки) или развлекательных устройств.

Мобильные роботы, предназначенные для использования на поверхности Земли или внутри помещений, относятся к категории наземных беспилотных устройств. В качестве движителя в наземных беспилотных устройствах используются колеса или гусеницы, режы – конечности, шнеки и т.п.

Основное применение на сегодняшний день мобильные роботы находят в хорошо структурированных средах, например, в складских помещениях. Это связано, в первую очередь, с тем, что вероятность сбоев в работе мобильного робота при воздействии неожиданных помех остается достаточно высокой.

Именно поэтому мобильные роботы являются одним из основных направлений современных исследований в области информационных технологий и искусственного интеллекта. Каждый крупный университет имеет одну или несколько лабораторий, ориентированных на исследования в области мобильной робототехники.

Для ускорения разработки группы исследователей могут использовать мобильные платформы, применение которых позволяет сосредоточиться на высокоуровневых аспектах поведения мобильного робота, а не заниматься вопросами вращения каждого отдельно взятого колеса.

Под мобильной платформой в дальнейшем будет пониматься набор механических, электрических, мехатронных и электронных компонентов, а также специальное программное обеспечение, предназначенные для создания мобильных роботов различного назначения.

Мобильная платформа позволяет:

- обеспечить базу для быстрого исследования навигационных алгоритмов или применения искусственного интеллекта в управлении автономной системой;
- обеспечить подбор минимально необходимого множества датчиков сенсорной системы робота;
- обеспечить подбор системы актуаторов/манипуляторов в соответствии с требова-

ниями решаемой задачи.

На рынке представлены несколько вариантов мобильных платформ, их достоинства и недостатки будут кратко рассмотрены ниже. Анализируемые мобильные платформы сгруппированы по размерам, условно выделены 3 категории:

- микроплатформы, линейные размеры которых не превышают 0,4 – 0,6 м;
- миниплатформы с размерами, не превышающими 0,5 – 0,8 м;
- компактные платформы, достигающие до 1 – 1,5 м по какому-либо из измерений.

Микроплатформы. VEX Robotics Design System [2] – конструктор для создания мобильных роботов. В состав входят комплект стандартных механических деталей, электродвигатели, видеочамера, контроллер управления, элементы беспроводной связи. Программирование осуществляется с помощью фирменного компилятора, основной язык – С.

Robotech RDS-X01 Robodesigner [3] – конструктор. Состав во многом аналогичен предыдущей платформе, но сенсорная подсистема шире, в нее входят датчики приближения и контактные датчики. Контроллер программируется с использованием проприетарной среды и специального языка программирования.

LEGO Mindstorms [4] – конструктор. В составе – набор стандартных блоков конструктора Lego, позволяющий собирать различные механические конструкции, управляющий контроллер, набор сенсоров: микрофон, ультразвуковой дальномер, датчик освещенности, датчик касания, тахометр. Программируется платформа с использованием языка С и специальной IDE RobotC.

Surveyor SRV-1 Blackfin [5] – специализированная мобильная платформа, представляющая собой гусеничное шасси с установленными контроллером (с ядром цифрового сигнального процессора) и видеочамерой. Основное назначение – передача видеоинформации из произвольной точки помещения. Размеры платформы и параметры двигательной подсистемы практически не позволяют расширять набор оборудования, установленный на платформе.

Миниплатформы.

iRobot Create [6] – шасси робота-пылесоса Roomba (двигатели, контроллер управления, механическая часть) с возможностью подключения дополнительного оборудования через проприетарный разъем с использованием цифровых или аналоговых сигналов. Набор дополнительного оборудования невелик: пульт ДУ, зарядное уст-

ройство со специальным маяком, отдельный маяк. Специализированный контроллер дает возможность подключать внешние устройства по интерфейсу USB.

EvolutionRobotics ER1 – шасси (без контроллера) для создания мобильного робота. В качестве контроллера используется ноутбук со специальным ПО. Из датчиков возможно только подключение веб-камеры.

Acroname Garcia [7] – мобильный робот с возможностью расширения сенсорной системы.

Университетские проекты: Trikebot (университет Карнеги-Меллона, США) набор деталей, электроники и ПО, необходимые для создания мобильного робота.

Компактные платформы.

MobileRobots Seekur [8] – мобильная платформа. Доступно расширение сенсорной системы за счет увеличения количества датчиков и применения датчиков, основанных на различных физических принципах.

Segway Robotic Mobility Platform (RMP) [9] – линейка мобильных платформ от компании Segway. Оснащаются контроллером двигателей, сенсорная система полностью отсутствует. Младшая модель семейства (RMP-50XL) может быть отнесена к миниплатформам, старшая – RMP-440 – к компактным.

Налицо тенденция: с увеличением размеров мобильной платформы количество фирм, предлагающих соответствующие платформы, уменьшается. Очевидная причина – проблемы с транспортировкой, хранением, тестированием и использованием платформы.

Риски повреждения как самой платформы, так и окружающих предметов, увеличиваются с размерами платформы, тогда как степень развития управляющего программного обеспечения верхнего уровня пока еще явно недостаточна для безопасного использования платформ, сколь угодно подходящих для транспортных систем.

Еще одна тенденция: на рынке не представлены (как минимум, в открытом доступе) платформы, по габаритным размерам сопоставимые с легковым автомобилем. Тем не менее, потребность в совершенствовании программного обеспечения для беспилотных автомобилей очевидно выражена: ведущие мировые автопроизводители внедряют элементы беспилотного движения в выпускаемые серийно автомобили; высокотехнологичные компании, в частности Google, разрабатывают и испытывают образцы беспилотных машин; соревнования беспилотных автомобилей давно вышли за рамки организуемого агентством передовых оборонных исследова-

тельских проектов министерства обороны США (DARPA) «Grandchallenge». По оценкам аналитиков IEEE, парк автономных транспортных средств к 2040 году достигнет 75 % от общего числа автомобилей [1].

Таким образом, существует потенциальная ниша для производителей мобильных платформ: мобильные платформы, соизмеримые с легковым автомобилем класса А – С (по европейской классификации). Успешное продвижение платформ данного типа зависит от их особенностей и возможности оперативной модернизации сенсорной системы в совокупности с наращиваемой вычислительной мощностью бортового компьютера.

Одно из важнейших на сегодняшний день требований – компактность и малый вес платформы, поскольку данные параметры позволяют существенно снизить затраты на транспортировку мобильного робота и минимизировать ущерб в случае столкновений.

Экспериментальная часть. Отладочная робототехническая платформа разработана на базе легкой алюминиевой быстросборной рамы с четырьмя независимыми поворотными ведущими мотор-колесами. На рисунке 1, а представлен полноразмерный вариант робототехнической платформы, а на рисунке 1, б – компактный.



Рисунок 1 – Ходовая часть робототехнической платформы:
а – полноразмерный вариант; б – компактный вариант

Простота сборки и разборки обеспечивается за счет использования лишь четырех болтовых соединений, скрепляющих несущие ребра пар электромеханических колесных узлов с продольными балками. Каждый электромеханический колесный узел состоит из мотор-колеса на базе трехфазного бесколлекторного электродвигателя со встроенными датчиками Холла для измерения угловой скорости и направления вращения. Поворот колеса осуществляет коллекторный электродвигатель с червячным редуктором, измерение угла поворота выполняет оптический абсолютный энкодер. Таким образом, электромеханический привод робототехнической платформы состоит из четырех трехфазных бесколлекторных и четырех коллекторных электродвигателей, управление которыми осуществляют шесть плат универсальных силовых контроллеров (УСК) (разработка СКБ РГРТУ).

Структура рассматриваемой платформы представлена на рисунке 2. Три силовых полумоста каждого из универсальных силовых контроллеров УСК1 – 4, запитанных от бортовой сети электропитания 36В, управляют соответ-

ствующим трехфазным бесколлекторным электродвигателем БЭД, подключенным к клеммам М1, М2 и М3. Обратная связь по углу поворота и скорости вращения каждого колеса осуществляется на основе показаний встроенных датчиков Холла (ДХ), ШИМ-сигналы с выходов которых поступают на импульсные входы И УСК. ДХ запитаны от гальванически развязанного источника напряжения 5В.

Силовые ключи каждого из УСК 5 и 6, запитанных от бортовой сети электропитания 12В, программно объединены в два Н-моста. Таким образом, ресурсов обоих силовых контроллеров достаточно для управления четырьмя коллекторными электродвигателями КЭД, предназначенными для поворота ведущих колес на независимые углы. Значения этих углов измеряются оптическими абсолютными энкодерами ОАЭ и передаются по интерфейсу SSI на соответствующим образом сконфигурированные комбинированные дифференциальные разъемы КДР. Питание ОАЭ осуществляется от гальванически развязанного источника напряжения 15В.

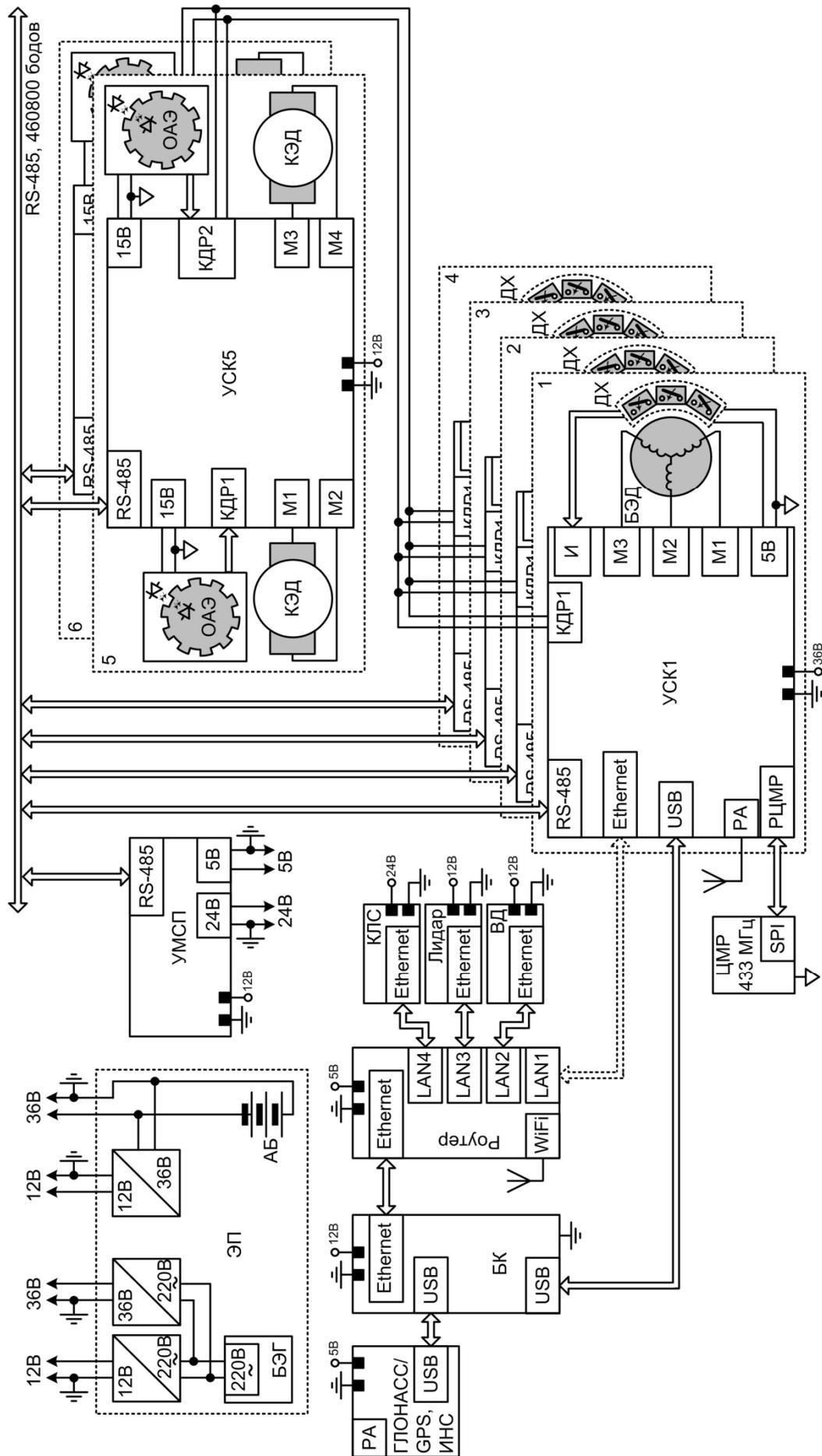


Рисунок 2 – Структура робототехнической платформы

Все УСК1 – 6, а также универсальный мультисенсорный преобразователь УМСП (разработка СКБ РГРТУ), осуществляют обмен данными по интерфейсу RS-485 и объединены между собой в сеть по топологии «звезда» с ведущим устройством УСК1. УСК1 получает команды управления по интерфейсу USB от бортового компьютера БК или по радиоканалу от внешней системы управления. В последнем случае приемником служит модуль цифрового радиоканала, подключенный вместе с антенной через разъемы РЦМР и РА. Помимо этого, УСК1 является источником дифференциального синхросигнала для УСК2 – 6.

Все ДХ и ОАЭ образуют проприоцептивную сенсорную систему. В состав экстероцептивной сенсорной системы входят лидар, лазерный сканер круговой диаграммой направленности КЛС, видеодатчик и ГЛОНАСС/GPS-модуль, который конструктивно исполнен в объединении с инерциальной навигационной системой ИНС, строго говоря, не входящей ни в одну из упомянутых сенсорных систем.

УМСП осуществляет преобразование напряжения бортовой электросети 12В в 24В для питания КЛС, а также в 5В – для питания ГЛОНАСС/GPS-модуля, ИНС и WiFi-роутера.

Бортовой компьютер осуществляет обработку измерительной информации экстероцептивной сенсорной системы и формирует команды управления для системы нижнего уровня по интерфейсу USB или резервному Ethernet-каналу.

Подсистема электропитания состоит из двух дублирующих каналов: источником одного из них является бензоэлектрогенератор БЭГ с выходом 220В переменного тока, а другого – аккумуляторная батарея АБ 36В. Одновременно к бортовой сети питания робототехнической платформы может быть подключен только один из этих каналов, при этом второй будет переведен в режим резерва.

Заключение. Проведенный анализ рынка мобильных робототехнических платформ позволил построить новую классификацию по их форм-фактору. Установлена зависимость количества предлагаемых платформ от их форм-фактора, причем с увеличением размеров платформы количество предложений падает, а в классе габаритных макетов автомобилей-роботов их вовсе нет. Указанная тенденция вступает в противоречие с возрастающим коли-

чеством коллективов, занимающихся разработкой автомобилей-роботов. В результате появляется возможность выхода на рынок мобильных платформ с продуктами, ориентированными на прототипирование автомобилей-роботов.

Разработана первая открытая робототехническая платформа для тестирования проприетарного и стороннего программного обеспечения автопилота. Она удовлетворяет концепции прототипа «автомобиля будущего», который по большинству экспертных прогнозов будет иметь все четыре независимо управляемые ведущие колеса для повышенной маневренности и лучшей интеграции в существующую инфраструктуру дорог общего назначения. Первые тесты платформы были успешно проведены в рамках полевых испытаний «Робокросс-2013» на полигоне «Березовая пойма» группы ГАЗ.

Библиографический список

1. News Releases [Electronic resource] // IEEE [Official website]. URL: http://www.ieee.org/about/news/2012/5september_2_2012.html (accessed: 07.11.2013).
2. VEX Robotics Curriculum [Official website]. URL: <http://curriculum.vexrobotics.com> (accessed: 07.11.2013).
3. Japan Robotech Limited [Official website]. URL: <http://www.japan-robotech.com/> (accessed: 07.11.2013).
4. LegoMindstorms, описание продукта [Электронный ресурс] // TheLEGOGroup [Официальный сайт]. URL: <http://www.lego.com/ru-ru/mindstorms> (accessed: 07.11.2013).
5. Surveyor SRV-1 BlackfinRobot [Electronic resource] // Surveyor Corporation [Official website]. URL: http://www.surveyor.com/SRV_info.html (accessed: 07.11.2013).
6. iRobot Create Programmable Robot [Electronic resource] // iRobot Corporation [Official website]. URL: <http://store.irobot.com/shop/index.jsp?categoryId=3311368> (accessed: 07.11.2013).
7. Garcia Custom Robot [Electronic resource] // Acroname Inc. [Official website]. URL: <http://www.acroname.com/garcia/garcia.html> (accessed: 07.11.2013).
8. Research Robots: Seekur [Electronic resource] // Adept MobileRobots [Official website]. URL: <http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/Seekur.aspx> (accessed: 07.11.2013).
9. The core of your mobile robotics solution [Electronic resource] // Segway Inc [Official website]. URL: <http://rmp.segway.com> (accessed: 07.11.2013).

УДК 519.688:621.865.8

Ю.С. Глазунова, А.А. Погудаев

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕСКОЛЬКИХ ГЛОНАСС/GPS-ПРИЕМНИКОВ

Рассмотрены методы повышения точности локализации наземных объектов с применением нескольких ГЛОНАСС/GPS-приемников. Проведено сравнение метода дифференциальной коррекции и метода усреднения сигналов спутниковых систем навигации. Выявлен характер погрешности определения координат модулями ГЛОНАСС/GPS.

Ключевые слова: *система навигации, точность позиционирования.*

Введение. В настоящее время проблема низкой точности позиционирования по сигналам спутниковых систем навигации является передовой областью исследований во многих отраслях науки и техники, особенно при локализации автомобилей-роботов, навигации самолетов, топографии и геодезии. В связи с этим в последние годы все чаще и чаще применяются системы, вносящие дифференциальные поправки в полученные от спутниковых систем навигации данные.

Целью работы является исследование возможности применения метода коррекции координат без контроля рабочего созвездия и сравнение его с методом простого усреднения координат, получаемых от нескольких ГЛОНАСС/GPS приемников, перемещаемых синхронно.

Теоретическая часть. Основными источниками ошибок, влияющими на точность навигационных вычислений, являются следующие факторы.

1. Ионосферные и тропосферные задержки сигналов. Использование систем спутниковой навигации построено на предположении: скорость распространения сигнала от спутников постоянна и равна скорости света. При прохождении радиосигналом ионосферы возникают задержки, искажающие результат вычислений расстояний до спутников. В тропосфере также возникают искажения и задержки, обусловленные содержанием в воздухе водяных паров. Среднеквадратичное значение погрешности при прохождении сигналом ионосферы составляет 4,5 м, тот же параметр для тропосферы составляет 3,9 м.

2. Погрешности, связанные с ходом атомных часов, установленных на спутниках ГЛОНАСС/GPS.

НАСС/GPS.

3. Использование отраженных спутниковых сигналов. При использовании бортового терминала ГЛОНАСС/GPS в сложных для приема условиях: высокие здания, горы или глубокие ущелья влияют на точность позиционирования.

4. Эфемеридная погрешность. Расхождение между расчетным положением GPS-спутника, которое устанавливается по данным навигационного сигнала, передаваемого с борта спутника, и его фактическим положением также вносит ошибки. Ведется постоянное уточнение орбит спутников ГЛОНАСС/GPS станциями слежения и передача данных в центр управления, где вычисляются уточненные элементы траекторий и поправки спутниковых часов. Указанные параметры вносятся в "альманах" и передаются на спутники, а те, в свою очередь, отсылают эту информацию ГЛОНАСС/GPS-приемникам. Среднеквадратичное значение погрешности для этого фактора составляет 8,2 м.

5. Геометрический фактор. Чем больше угол между направлениями на разные спутники, тем точнее измерения.

Суммарное среднеквадратичное значение погрешности для указанных выше и некоторых других факторов для системы GPS составляет 13,1 м [1].

Дифференциальная коррекция сигналов спутниковых систем реализуется с помощью контрольного навигационного приемника, называемого базовой станцией. Базовая станция устанавливается в точке с известными географическими координатами [2]. Сравнивая известные координаты с измеренными координатами, полученными от навигационных систем, базовый навигационный приемник формирует поправки,

которые далее используются для коррекции определения местоположения объектов мониторинга.

В свою очередь различают два метода вычисления поправок.

1. Метод коррекции координат, когда в качестве дифференциальных поправок с базовой станции передают добавки к измеренным в определяемом пункте координатам. Недостатком этого метода является то, что приёмники базового и определяемого пунктов должны работать по одному рабочему созвездию.

2. Метод коррекции навигационных параметров, при использовании которого на базовой станции определяются поправки к измеряемым параметрам для всех спутников, которые потенциально могут быть использованы потребителями. Эти поправки передаются потребителям и учитываются при решении навигационной задачи. Недостатком этого метода является повышение сложности аппаратуры потребителей [2].

Для проведения экспериментов по определению способа, позволяющего получить наименьшую погрешность локализации на основе сигналов ГЛОНАСС/GPS, была разработана система, состоящая из четырех экспериментальных устройств, разработанных в СКБ РГРТУ. Внешний вид системы приведен на рисунке 1.

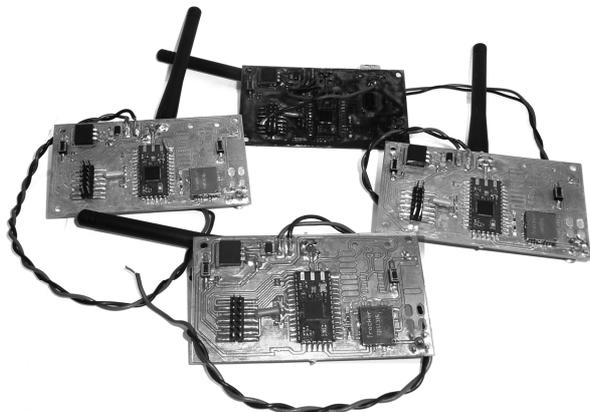


Рисунок 1 – Система сбора и коррекции данных спутниковых систем навигации

Каждое устройство имеет возможность размещения преобразователя интерфейсов (FT232RL) [3], линейного стабилизатора напряжения (LM1086ISX-3.3) и двух модулей – радиочастотного (TE-CC430F51-433) и навигационного (GNS1316).

Структурная схема разработанного устройства представлена на рисунке 2.

Радиочастотный модуль построен на базе микроконтроллера CC430F5137 [4]. Навигационный модуль [5] – это высокочувствительный и сверхкомпактный приемник сигналов ГЛОНАСС/GPS, способный работать в условиях сла-

бого сигнала. Диапазон допустимых значений напряжений питания разработанного устройства – 3.3...27В. В системе реализована возможность альтернативного питания от внешнего источника или от USB.

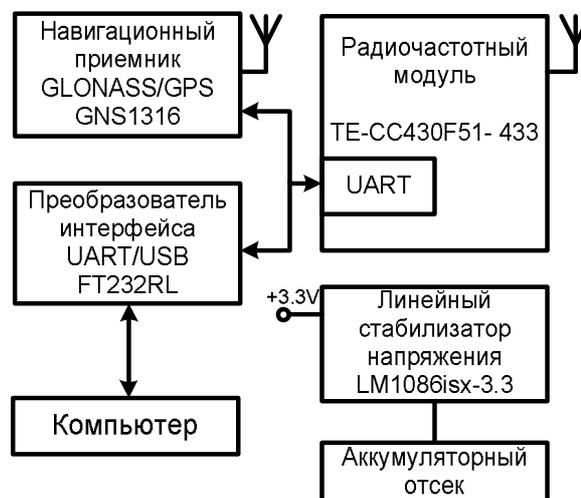


Рисунок 2 – Структурная схема разработанного устройства

При проведении эксперимента одно устройство будем считать внутренним (имеет связь с компьютером по интерфейсу USB), остальные – внешними (передающими данные на внутреннее устройство по радиоканалу).

Отличие внутреннего устройства от внешнего заключается в том, что вместо навигационного модуля оно имеет в составе преобразователь интерфейсов, используемый для передачи данных на компьютер.

Принцип работы всей системы заключается в следующем: каждый из внешних модулей принимает сигналы спутниковых систем навигации и после предварительной обработки посылает данные по радиоканалу на внутреннее устройство, которое, в свою очередь, передает их на ПК, где происходит обработка этих сигналов.

На рисунке 3 представлена функциональная схема внутреннего устройства.

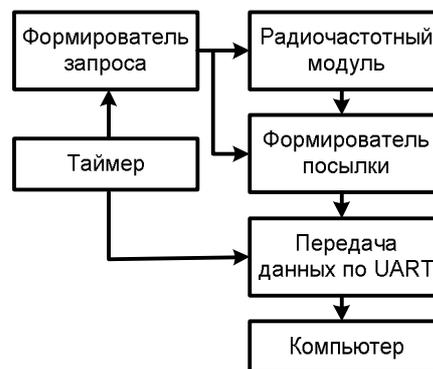


Рисунок 3 – Функциональная схема внутреннего устройства

По сигналу таймера формируется запрос, который передается через радиочастотный модуль каждому внешнему устройству. Фактически запрос представляет собой номер устройства, в ответ на который активированный модуль сообщает следующие данные: координаты, время, дату, высоту, погрешности определения высоты и ориентации на плоскости, номера активных спутников и ошибки передачи и преобразования данных. Также этот номер поступает на формирователь посылки, который добавляет полученные данные к номеру устройства и после получения данных от всех внешних устройств по сигналу таймера отправляет их на компьютер для дальнейшей обработки.

На рисунке 4 представлена функциональная схема внешнего устройства.

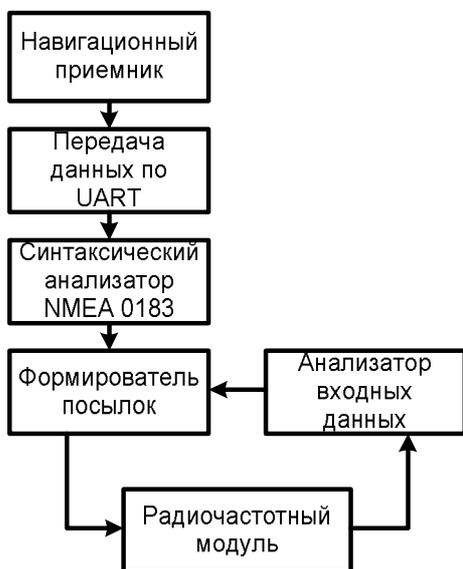


Рисунок 4 – Функциональная схема внешнего устройства

Навигационный приемник осуществляет передачу пакетов данных через определенные промежутки времени по интерфейсу UART формирователю посылки. После получения запроса от внутреннего устройства радиочастотный модуль направляет его в анализатор входных данных, который хранит собственный номер внешнего устройства. При совпадении запроса с номером устройства собранные на данный момент в формирователе посылки данные передаются на радиочастотный модуль, а затем – по радиоканалу внутреннему устройству. Далее ожидается новый запрос и цикл повторяется.

Внутреннее устройство подключается к компьютеру посредством интерфейса USB, по которому передается сформированная посылка, содержащая в себе данные со всех модулей. Программа верхнего уровня написана на языке программирования C++ в среде разработки Qt.

Ее функциональная диаграмма представлена на рисунке 5.

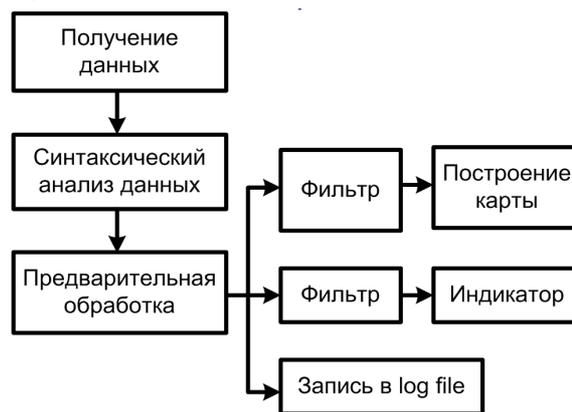


Рисунок 5 – Функциональная диаграмма программы верхнего уровня

Программа верхнего уровня получает данные по интерфейсу USB и осуществляет их синтаксический анализ. Затем данные, принятые от каждого внешнего модуля, проходят отдельную предобработку, во время которой отсеиваются некорректные и повторяющиеся сообщения. Далее эти данные записываются в файл, а также после фильтрации, которая заключается в отсеивании сообщений с ошибками и пустых сообщений, визуализируются и передаются на индикатор. Снимок экрана с работающей программой верхнего уровня представлен на рисунке 6.

Экспериментальная часть. Цель эксперимента заключается в оценке погрешности определения местоположения в следующих случаях:

- используется один модуль;
- используются три внешних модуля, один из которых является мобильным, а другие исполняют роль маяков;
- используются три внешних модуля, все являются мобильными и перемещаются синхронно.

Как показала практика, необходимо проводить каждый эксперимент несколько раз через некоторый временной интервал, так как один из важнейших факторов, влияющих на точность локализации – это расположение и число спутников, с которыми есть связь.

При работе с обычными ГЛОНАСС/GPS-приемниками отсутствует возможность использования принципа дифференциальной коррекции в чистом виде. В связи с этим в эксперименте реализован метод коррекции координат без контроля рабочего созвездия, использующий несколько базовых станций (в нашем случае – маяков) для определения коррекции в соответствии с некоторым коэффициентом доверия k . Этот коэффициент вычисляется для каждого маяка на основе информации о текущем рабочем созвез-

дии, а также на основе возвращаемого параметра – точности в горизонтальной плоскости.

$$k = s / hdop, \quad (1)$$

где s – коэффициент соответствия рабочих созвездий мобильного модуля и маяка, которые

обозначены в разделе «активные спутники» (рисунок 6) светлыми кругами, а $hdop$ – погрешность в горизонтальной плоскости, определяемая модулем маяка и отображаемая в разделе «погрешности», подразделе «горизонтальная» (рисунок 6).

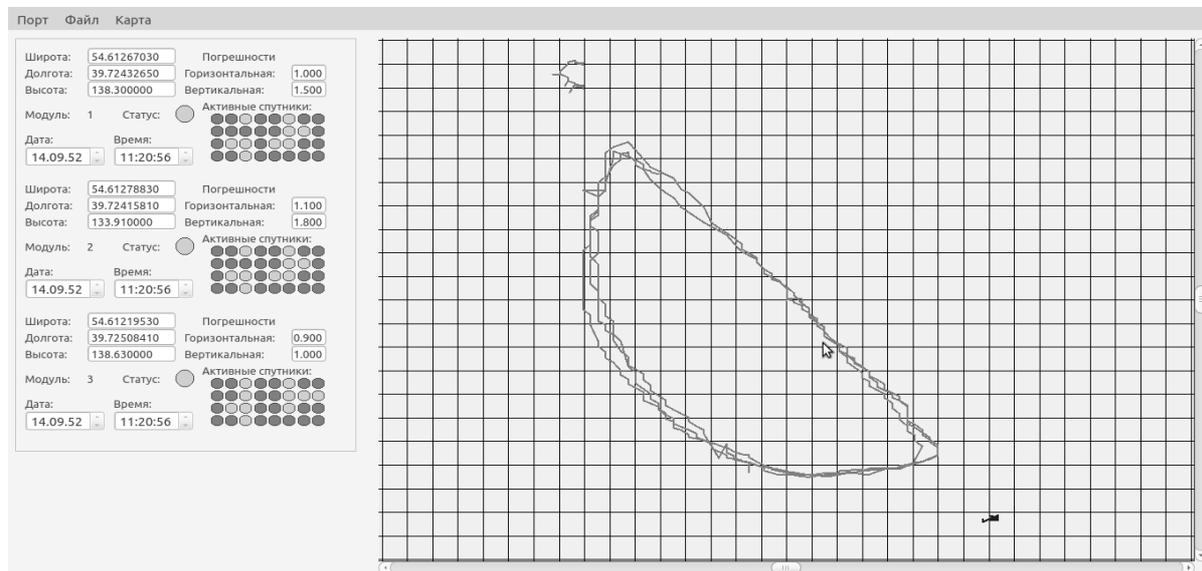


Рисунок 6 – Снимок экрана с работающей программой верхнего уровня

Эксперимент проходил следующим образом: два внешних модуля использовались в качестве маяков, а третий внешний модуль в течение нескольких часов перемещали по одной и той же замкнутой траектории. Вся информация посредством внутреннего модуля, передавалась на компьютер, где записывалась в файл для дальнейшего анализа. Во второй фазе эксперимента все три внешних модуля перемещали по той же траектории. Эта фаза также длилась более часа, и все данные записывались в файл.

Анализ полученных данных. После завершения сбора данных из них были удалены сообщения, содержащие ошибки приема, и построена траектория движения одного мобильного внешнего модуля без какой-либо коррекции для первой (рисунок 7) и второй (рисунок 8) фаз эксперимента.

Эти траектории являются контрольными для сравнения с различными методами коррекции.

Из рисунков видно, что разброс значений в обоих случаях примерно и составляет около 12 метров.

В первой фазе эксперимента используются два маяка. Для коррекции по ним координат мобильного модуля вычисляется коэффициент доверия k для каждого из маяков. После этого коэффициенты приводятся к единице.

Затем вычисляются векторы коррекции \mathbf{d}_1 и

\mathbf{d}_2 для каждого из маяков. По этим векторам и нормированным коэффициентам k_{n1} и k_{n2} (для каждого маяка) вычисляется результирующий вектор коррекции \mathbf{D} по следующей формуле:

$$\vec{D} = \vec{d}_1 \cdot k_{n1} + \vec{d}_2 \cdot k_{n2}. \quad (2)$$

После выполнения вычислений строится траектория, соответствующая перемещению мобильного модуля с коррекцией по маякам (рисунок 9).

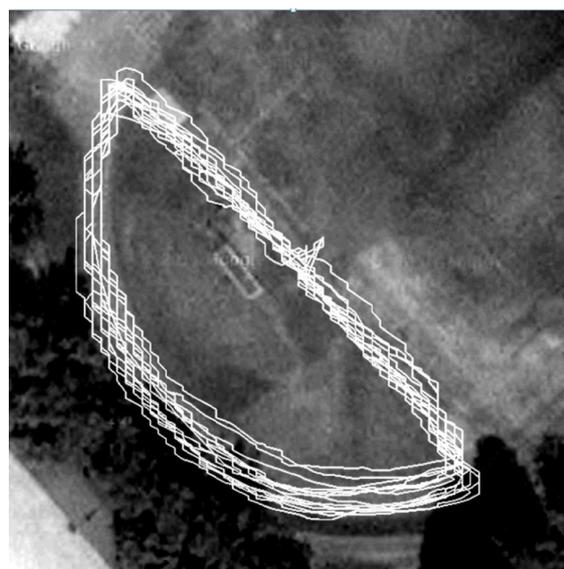


Рисунок 7 – Траектория по данным с одного модуля в первой фазе эксперимента

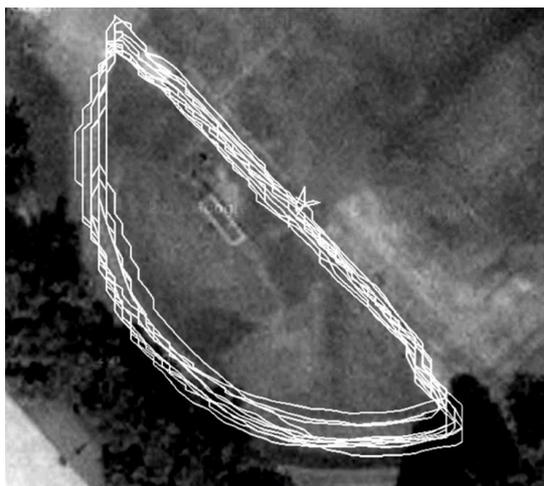


Рисунок 8 – Траектория по данным с одного модуля во второй фазе эксперимента



Рисунок 9 – Траектории движения с учетом коррекции по маякам.



Рисунок 10 – Траектории движения с использованием усреднения

Сравнив траектории на рисунках 7 и 9, можно заметить, что коррекция с использованием маяков не дала положительных результатов. В ходе анализа также были построены траектории с коррекцией только по одному маяку, но они показали результат хуже, чем в случае коррекции по двум маякам.

Затем данные второй фазы эксперимента были усреднены по трем модулям и по полученным результатам была построена траектория, изображенная на рисунке 10.

Заключение. Сравнивая траектории, изображенные на рисунках 7 и 9, и траектории, изображенные на рисунках 8 и 10, можно сделать следующие выводы.

1. Погрешность определения координат используемыми модулями ГЛОНАСС/GPS в большей степени является случайной, а не систематической. Соответственно усреднение координат, возвращаемых несколькими ГЛОНАСС/GPS-приемниками, которые перемещаются синхронно, позволяет определить координаты

точнее, чем при использовании простой дифференциальной коррекции, не контролирующей рабочие созвездия.

2. Маяки можно использовать для определения степени доверия определяемым координатам подвижного объекта. Так как в тех областях, где погрешность определения координат маяка больше, погрешность определения координат подвижного объекта также будет больше. На рисунке 6 в левом верхнем и правом нижнем углах видны изменения координат неподвижных маяков. В верхней части карты разброс координат больше, чем в нижней, как у маяка, так и у мобильного модуля.

При дальнейшем анализе имеет смысл применение алгоритмов адаптивной фильтрации полученных данных.

Библиографический список

1. Анучин О.Н., Емельянец Г.И. Интегрированные системы ориентации для морских подвижных объектов / под ред. В. Г. Пешехонова. — 2-е изд. — СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2003. — С. 160-161. — 390 с. — ISBN 5-900780-47-3.
2. Поваляев Е.И., Хуторной С.В. Дифференциальные системы спутниковой навигации. Обзор современного состояния [электронный ресурс]: <http://gpsinfo.ru> (дата просмотра 10.11.2013).
3. FT232R USB UART IC Datasheet [Electronic resource] // Future Technology Devices International Ltd. [Official website]. URL: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf (accessed: 11.11.2013).
4. CC430 Family User's Guide [Electronic resource] // Texas Instruments [Official website]. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/slau259e/slau259e.pdf> (accessed: 11.11.2013).
5. Model GNS1316 GLONASS/GPS Engine Board [Electronic resource] // Tracker Technology Co., LTD. [Official website]. URL: <http://www.tracker.com.tw/GNS1316.html> (accessed: 11.11.2013).