



На правах рукописи

Захарова Елена Александровна

**ИНФОРМАЦИОННО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ВЕДУЩЕГО
И ВЕДОМОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Специальность: 2.2.11.

Информационно-измерительные и управляющие системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Научный руководитель:

Голь Станислав Артурович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Информационно-измерительная
и биомедицинская техника» ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный
радиотехнический университет им.
В.Ф. Уткина», г. Рязань

Официальные оппоненты:

Цариченко Сергей Георгиевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Комплексной безопасности в
строительстве» ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет», г. Москва

Куликов Роман Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
директор Института радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский)
федеральный университет», г. Казань

Защита состоится «**29**» сентября 2022 г. в 12 ч 00 мин на заседании диссертационного совета **24.2.375.03** в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и на официальном сайте университета <http://www.rsreu.ru>

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.375.03
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие автономизации транспортных средств (ТС) с целью увеличения безопасности, улучшения условий труда и сокращения расходов, связанных с грузоперевозками, привело к появлению сценария работы роботизированных ТС в составе автономного каравана. Автономный караван предполагает движение ведомого ТС по траектории, максимально приближенной к траектории движения ведущего, которым может быть как другое ТС, так и человек.

Подобный сценарий работы необходим во многих сферах деятельности человека. Так, например, в военной сфере автономные караваны используются для транспортировки грузов и поддержки пехоты, что позволяет снизить уровень риска для здоровья и жизни людей. Помимо этого режим следования за ведущим используется для малогабаритных роботов, производящих разведку городской местности в условиях боевых действий.

В гражданской сфере использование автономных караванов позволит улучшить качество логистики и снизить уровень затрат при транспортировке грузов как на дорогах общего пользования, так и внутри территорий промышленных предприятий, осуществляя перевозку грузов для внутренних нужд. В сельском хозяйстве также существует потребность в подобном режиме работе роботизированных ТС, поскольку существует ряд операций, выполнение которых необходимо сделать за короткие сроки, так как от этого зависит рентабельность. Примером подобных операций может служить, например, уборка зерновых культур с использованием комбайнов и бункеров-перегрузчиков, а также параллельные процессы обработки почвы и посева вдоль ряда.

Для воспроизведения траектории движения лидера каравана ведомым ТС необходима точная и надежная оценка положения ведущего относительно ведомого. Именно поэтому информационно-измерительный комплекс (ИИК), обеспечивающий оценку взаимного положения ведущего и ведомого, играет большую роль для реализации всего сценария в целом. Основными требованиями к ИИК является точность, работоспособность в дневное и ночное время суток в любых погодных условиях как вне, так и внутри помещения и низкая стоимость относительно цены всего ведомого ТС.

Степень разработанности темы. Разработками в сфере движения автономных роботов в составе каравана занимались российские и зарубежные ученые, а именно И.Л. Ермолов, С.Л. Зенкевич, Р.С. Курганский, С.А. Соболев, М.С. Baltzer, A. Stancovici, S.M. Martin и др.

Среди групп разработчиков технологии автономного вождения

можно выделить компании КАМАЗ, ГАЗ, Daimler, MAN Truck, Oshkosh Defense, Rheinmetall и научные коллективы Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН в лице В.Г. Градецкого, М.М. Князькова и др., Института автоматики и электрометрии СО РАН в лице Ю.Н. Золотухина, К.Ю. Котова и др, Университет Бундесвера в Мюнхене в лице С. Fries, H.J. Wuensche и др.

В зарубежных научных работах вопрос структуры и алгоритмов функционирования ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС освещается достаточно широко. Большинство работ посвящено комбинированию измерительных данных разнородных датчиков, что повышает надежность подобных комплексов, однако приводит к большой вычислительной сложности и увеличению стоимости по отношению к самому роботизированному ТС.

Целью работы является разработка алгоритмического обеспечения информационно-измерительного комплекса, позволяющего выполнять оценку взаимного положения ведущего и ведомого ТС с последующим восстановлением траектории движения ведущего для движения в составе автономного каравана при наличии неблагоприятных факторов окружающей среды внутри и вне помещений в любое время суток.

Для достижения цели решаются следующие **задачи**.

1. Разработка и исследование методов получения оценки взаимного положения ведущего и ведомого ТС.
2. Разработка алгоритма восстановления траектории движения ведущего, необходимого для планирования движения ведомого ТС.
3. Разработка алгоритма компенсации систематической составляющей определения взаимного положения ведущего и ведомого в составе автономного каравана по данным ГНСС.
4. Разработка аппаратной части ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС.
5. Разработка алгоритма калибровки ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС.
6. Испытание и исследование ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС с целью подтверждения правильности предложенных решений.

Методы исследования базируются на методах математического моделирования, методах цифровой фильтрации сигналов, теории вероятности, численных методах оптимизации.

Научная новизна.

1. Предложен и реализован алгоритм восстановления траектории ультразвукового маяка во время движения в составе автономного каравана на основе данных пространственной решетки модулей

приема ультразвукового сигнала информационно-измерительного комплекса, снижающий СКО погрешности восстановления.

2. Разработан алгоритм компенсации систематической составляющей погрешности определения взаимного положения ведущего и ведомого в составе автономного каравана по данным ГНСС на основе измерительных данных образцового ультразвукового измерительного канала.
3. Предложен и реализован комплексный алгоритм оценки положения и траектории ведущего во время движения в составе автономного каравана, использующий спорадическую компенсацию погрешности оценки положения и траектории, выполняемую при выходе маяка из зоны действия решетки модулей приема ультразвукового сигнала.
4. Разработан метод автоматизированной калибровки информационно-измерительного комплекса определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС на основе измерительных данных образцового лидача.

Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными для каждого из предложенных алгоритмов.

Практическая значимость и внедрение результатов работы.

1. На основе предложенных методов и алгоритмов разработан опытный образец ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС.
2. Серия испытаний опытного образца ИИК показала целесообразность применения разработанных методов и алгоритмов в системах караванного вождения.
3. Результаты работы были использованы при выполнении СЧ ОКР «Разработка и изготовление макета системы следования за маяком» для АО «ВНИИ «Сигнал».
4. Результаты работы использованы в разработках ООО «КБ АВРОРА».
5. Результаты внедрены в учебный процесс РГРТУ.

Внедрение результатов работы. Результаты работы были использованы в АО «ВНИИ «Сигнал», а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

Положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритм восстановления траектории ведущего во время движения в составе автономного каравана на основе модифицированного метода Рауха-Тунга-Штрибеля, снижающий СКО погрешности восстановления на 16% по сравнению с базовыми алгоритмами.

2. Комплексный алгоритм оценки положения и траектории ведущего во время движения в составе автономного каравана, использующий спорадическую компенсацию систематической составляющей погрешности ГНСС и снижающий систематическую погрешность на 45%.
3. Метод автоматизированной калибровки информационно-измерительного комплекса определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС, снижающий погрешность оценки положения ведущего на 70% по сравнению с использованием номинальных характеристик комплекса.

Апробация работы проведена в форме научных докладов, дискуссий по основным результатам диссертационной работы, которые включали следующие основные конференции и форумы: Всероссийская НТК «Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы – БИОМЕДСИСТЕМЫ-2018» (Рязань, 2018 г.), Международная НТК «21st International Symposium on Measurement and Control in Robotics, ISMCR 2018» (Ланс, Бельгия, 2018 г.), Международная НТК «8th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2019» (Будва, Черногория, 2019 г.), а также в форме испытаний, таких как международные испытания и динамический показ робототехнических систем «ELROB-2016» (Эгендорф, Австрия, 2016 г.) и «ELROB-2018» (Ланс, Бельгия, 2018 г.), динамический показ на Международном военно-техническом форуме «АРМИЯ-2015».

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 149 страниц, содержащих 67 рисунков и 7 таблиц. Список использованной литературы включает 155 источников.

Публикации по теме диссертации.

Опубликовано 8 печатных работ, из них – 2 статьи из списка изданий, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в международных изданиях из базы Scopus, 4 тезиса докладов на конференциях, также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612136.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена проблематика работы, обоснована актуальность работы, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена обзору и сравнительному анализу известных решений в области ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС. По типу используемых датчиков существующие комплексы можно классифицировать следующим образом:

- ИИК, основанные на глобальных системах спутникового позиционирования, таких как ГЛОНАСС, GPS, BeiDou и т.д.;
- ИИК, основанные на камерах видимого и инфракрасного диапазона;
- ИИК, основанные на лазерных сканерах;
- ИИК, основанные на ультразвуковых датчиках;
- ИИК, основанные на использовании радиосигналов и направленных антенн;
- ИИК, основанные на разных типах датчиков.

Каждый подход к построению подобных комплексов имеет свои достоинства и недостатки, определяющие область применения конкретного комплекса.

Комплексы, основанные на разных типах датчиков, имеют преимущество, заключающееся в расширении сферы применимости указанных комплексов, за счет введения большого количества дублирующих измерительных каналов. Однако стоимость и вычислительная сложность алгоритмов подобных комплексов возрастает по мере увеличения общего количества разнородных датчиков.

Использование комплексов, основанных на ГНСС-приемниках, ограничено открытыми территориями. В урбанизированной местности, подземных туннелях, на закрытых территориях предприятий оценка положения ГНСС-приемника сильно ухудшается либо вовсе отсутствует. Комплексование данных от ГНСС-приемника с бортовой инерциальной навигационной системой автономного ТС позволяет сгладить негативные эффекты на некоторый промежуток времени. Однако из-за дрейфа оценки положения ИНС, долгое нахождение ведущего и ведомого ТС в условиях отсутствия видимости спутников ГНСС серьезно ухудшает работу комплекса.

Комплексы, основанные на камерах видимого и инфракрасного диапазона, предоставляют большое количество информации, которая используется для идентификации ведущего и определения взаимного положения, однако работоспособность подобных комплексов сильно зависит от условий окружающей среды, наличия осадков и необходимого уровня освещенности. Осадки также увеличивают степень зашумленности измерительных данных комплексов, основанных на лазерных сканерах, что отражается в появлении большого количества дополнительных объектов, соответствующих типу осадков.

В свою очередь ультразвуковые датчики сохраняют свою

функциональность внутри и вне помещений, в любое время суток, при наличии неблагоприятных факторов окружающей среды, таких как осадки, пыль, дым и т.д. Помимо этого в полосе частот, соответствующей ультразвуковому излучению, сравнительно мало сторонних акустических помех, что положительно влияет на точность оценки взаимного положения. Требуемая вычислительная мощность для реализации ИИК с использованием ультразвуковых датчиков и его конечная стоимость по сравнению с другими типами комплексов достаточно мала. Таким образом, ИИК, основанные на ультразвуковых датчиках, обладают большим количеством преимуществ по отношению к другим системам.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию комплексного алгоритма оценки положения и траектории ведущего во время движения в составе автономного каравана.

Структура ИИК представлена на рисунке 1.

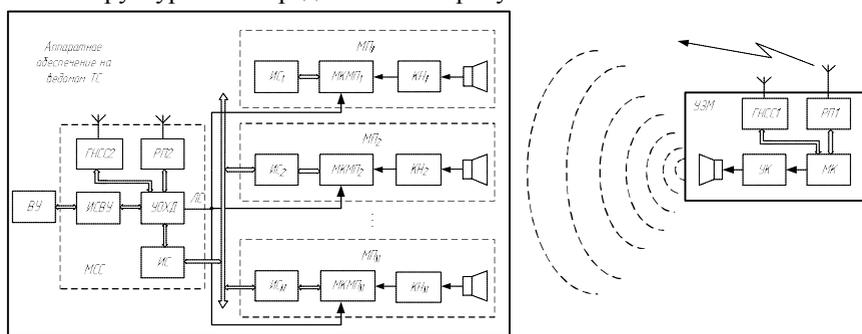


Рисунок 1. Аппаратная структура ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС

ИКК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС включает в себя активный ультразвуковой маяк (УЗМ), размещаемый на ведущем и пространственную решетку модулей приема ультразвукового сигнала (МП), закрепляемую на ведомом ТС.

Через равные промежутки времени УЗМ испускает ультразвуковую волну и одновременно с этим передает сигнал синхронизации модулю синхронизации и сбора данных (МСС) по радиосвязи. Поскольку скорость распространения радиоволн намного выше скорости распространения ультразвукового сигнала, временем пролета сигнала синхронизации можно пренебречь. Каждый из МП измеряет временной интервал с момента прихода сигнала синхронизации до момента прибытия ультразвуковой волны. Указанные временные интервалы пропорциональны расстояниям r_1, \dots, r_N от УЗМ до каждого МП.

Для определения вектора координат маяка \vec{u} необходимо решить систему нелинейных уравнений с условием $N \geq 3$

$$r_n^2 = (x^m - x_n)^2 + (y^m - y_n)^2 + (z^m - z_n)^2, n = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где $\vec{u} = [x^m \ y^m \ z^m]^T$ – вектор искоемых координат маяка и $\vec{x}_n^r = [x_n \ y_n \ z_n]^T$ – координаты n -ого приемника в локальной системе координат ведомого ТС.

Для уменьшения влияния выбросов на конечную оценку вектора искоемых координат маяка \vec{u} результаты измерений каждого из МП проходят предварительную обработку, заключающуюся в идентификации артефакта пороговым методом и дальнейшей замене его на экстраполированное значение. Измерение $r_{n,k}$ признается выбросом, если

$$|r_{n,k} - r_{n,k-1}| > \rho,$$

где ρ – настраиваемая константа, k – номер отсчета. Константа ρ выбирается исходя из предположения о максимальном возможном перемещении ультразвукового маяка за один цикл измерений.

Поскольку система уравнений (1) нелинейна, то очевидным выбором методов решения системы являются нелинейные алгоритмы оценивания. Однако нелинейная система уравнений может быть приведена к линейному виду с использованием всех комбинаций разностей квадратов расстояний

$$r_1^2 - r_i^2 = (x^m - x_1)^2 + (y^m - y_1)^2 + (z^m - z_1)^2 - (x^m - x_i)^2 - (y^m - y_i)^2 - (z^m - z_i)^2, i = 2, \dots, N.$$

После алгебраических преобразований система нелинейных уравнений (1) принимает вид

$$B\vec{u} = \vec{g}, \quad (2)$$

где B – матрица системы, состоящая из L строк вида $[2(x_j - x_i) \ 2(y_j - y_i) \ 2(z_j - z_i)]$, \vec{g} – вектор свободных членов, состоящий из L элементов

$$(r_i^2 - r_j^2 + x_j^2 - x_i^2 + y_j^2 - y_i^2 + z_j^2 - z_i^2); i, j = 1, \dots, N; i \neq j.$$

При этом количество уравнений, по сравнению с исходной системой (1), становится равным $N-1$. Таким образом, существует несколько конкурирующих методов оценки положения маяка, работающих с нелинейными моделями: расширенный фильтр Калмана, ансцентный фильтр Калмана, фильтр частиц. С линейными моделями применяются

методы наименьших квадратов и фильтр Калмана. Характер рассматриваемой задачи, заключающейся в восстановлении участка траектории движения ведущего, необходимого для планирования движения ведомого ТС, позволяет использовать совместно с фильтром Калмана алгоритм сглаживания Рауха-Гунга-Штрибеля.

Алгоритм сглаживания позволяет уточнить состояние системы \vec{x}_{k-T} , используя наблюдения, оценки вектора состояния и матрицы ковариации состояния, полученные с помощью фильтра Калмана на временных шагах как до, так и после интересующего временного шага. Однако рекурсия, в отличие от фильтра Калмана, развивается в обратном направлении, начиная от текущего положения маяка и заканчивая последней точкой, в которую необходимо попасть ведомому ТС, чтобы повторить траекторию движения ведущего.

Поскольку ИИК функционирует во время движения в составе автономного каравана, расстояние между ведущим и ведомым ТС, и, соответственно, протяженность интересующего участка траектории, необходимого для планирования движения ведомого ТС, постоянно изменяется. В виду вышеизложенного, классическое представление алгоритма сглаживания Рауха-Гунга-Штрибеля было модифицировано таким образом, что количество T используемых оценок вектора состояния и матрицы ковариации состояния фильтра Калмана варьируется и зависит от текущего взаимного положения ведущего и ведомого ТС.

Помимо этого, при реализации фильтра Калмана оценка матрицы ковариации шума измерений R_k вычисляется на каждой итерации цикла измерений с использованием оценки матрицы ковариации невязки измерений. Это позволяет учесть характер изменения дисперсии распределения r_n при увеличении расстояния между ведущим и ведомым ТС.

На этапе инициализации начальный вектор координат ультразвукового маяка вычисляется как псевдорешение системы (2)

$$\begin{bmatrix} x_0^m & y_0^m & z_0^m \end{bmatrix}^T = (B^T B)^{-1} B^T \vec{g}_0.$$

Алгоритм восстановления участка траектории движения ведущего представлен ниже. Для простоты описания интересующие оценки вектора состояния и матрицы ковариации состояния $\{\vec{x}_k, \vec{x}_{k-1}, \dots, \vec{x}_{k-T}\}$ и $\{P_k, P_{k-1}, \dots, P_{k-T}\}$, полученные с помощью фильтра Калмана, перенумерованы следующим образом: $\{\vec{x}_T, \vec{x}_{T-1}, \dots, \vec{x}_0\}$, $\{P_T, P_{T-1}, \dots, P_0\}$.

1 **входные данные:** $\{\vec{x}_T, \vec{x}_{T-1}, \dots, \vec{x}_0\}, \{P_T, P_{T-1}, \dots, P_0\}, A, Q, T$

2 **выходные данные:** $\{\vec{x}_T^s, \vec{x}_{T-1}^s, \dots, \vec{x}_0^s\}, \{P_T^s, P_{T-1}^s, \dots, P_0^s\}$

3 **начало**

4 **для** $t = T \rightarrow 0$

5 $\vec{x}_{t+1|t} = A\vec{x}_t$

6 $P_{t+1|t} = AP_tA^T + Q$

7 $S_t = P_tA^TP_{t+1|t}^{-1}$

8 $\vec{x}_t^s = \vec{x}_t + S_t(\vec{x}_{t+1}^s - \vec{x}_{t+1|t})$

9 $P_t^s = P_t + S_t(P_{t+1}^s - P_{t+1|t})S_t^T$

10 **конец**

11 **конец**

Для проверки всех шести конкурирующих методов оценки положения маяка и восстановления траектории его движения была разработана математическая модель ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС. Результаты моделирования показали, что предлагаемый алгоритм восстановления траектории движения маяка на основе метода Рауха-Тунга-Штрибеля продемонстрировал лучшие результаты СКО и погрешности восстановления по сравнению с остальными методами.

Были проведены натурные испытания опытного образца комплекса, во время которых активный маяк размещался на мобильном роботе типа «Вомбат», который двигался по определенной, заданной заранее траектории относительно статичной пространственной решетки МП.

Результаты испытаний в виде восстановленной траектории движения маяка и погрешности восстановления представлены на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2 оценка траектории фильтром Калмана со сглаживанием по модифицированному алгоритму Рауха-Тунга-Штрибеля наиболее приближена к образцовой траектории движения маяка, что подтверждается наименьшим значением среди всех максимальных значений погрешности восстановления, как на плоскости, так и в пространстве. Модифицированный алгоритм сглаживания Рауха-Тунга-Штрибеля продемонстрировал лучшие результаты по сравнению с другими базовыми методами и позволил снизить СКО погрешности восстановления на 16% по сравнению с базовыми алгоритмами.

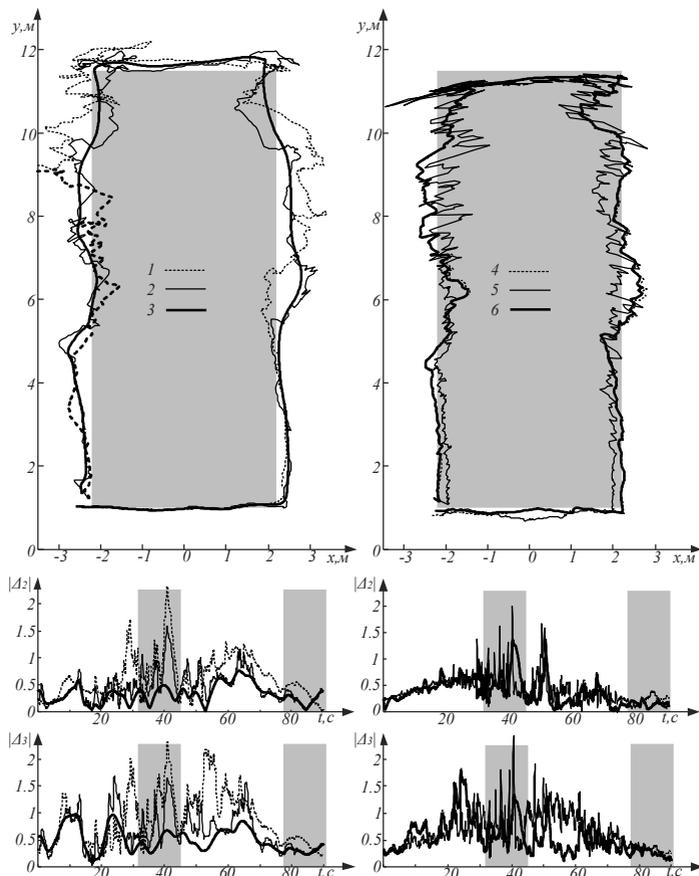


Рисунок 2. Оценка траектории маяка и погрешность восстановления в динамическом режиме работы комплекса, $4,6 \times 11,5$ м: 1 – усреднение псевдорешения методом экспоненциального сглаживания, 2 – фильтр Калмана, 3 – фильтр Калмана со сглаживанием по модифицированному алгоритму Рауха-Тунга-Штрибеля, 4 – ансентный фильтр Калмана, 5 – фильтр частиц, 6 – расширенный фильтр Калмана

Радиус видимости ультразвукового маяка пространственной решеткой МП ограничен 20-ю метрами, что в некоторых случаях является недостаточным. Для расширения дальности работы комплекса в состав маяка включается дополнительный измерительный канал на основе ГНСС-

приемника, использующего абсолютный метод определения координат, систематическая погрешность которого снижается за счет введения корректирующих поправок $\vec{\zeta}_k$, вычисляемых с использованием измерительных данных пространственной решетки МП в момент нахождения маяка в зоне видимости по формуле,

$$\vec{\zeta}_k = \vec{x} - \vec{x}_k^G,$$

где \vec{x}_k^G – ГНСС оценка положения маяка в локальной системе координат ведомого робота на k -ом шаге алгоритма.

Результаты испытаний представлены в таблице 1. Комплексный алгоритм оценки положения и траектории ведущего во время движения в составе автономного каравана, использующий спорадическую компенсацию систематической составляющей погрешности ГНСС-приемника, продемонстрировал лучшие результаты по сравнению с базовым методом и позволил снизить систематическую составляющую погрешности на 45%.

Таблица 1. СКО оценки траектории движения маяка в пространстве

	СКО ($ \Delta_3 $), м
Оценка траектории движения ведущего по данным ГНСС-приемника	3,83
Комплексная оценка траектории движения ведущего по данным МП и скорректированным данным ГНСС-приемника	2,10

В третьей главе рассматривается автоматизированная процедура калибровки, необходимая для определения структурных параметров комплекса, а именно координат каждого из МП в локальной системе координат ведомого ТС с использованием образцового измерительного канала на основе лидара.

Во время проведения процедуры калибровки ультразвуковой маяк, помещенный в специальную рамку-мишень, покрытую светоотражательным материалом, перемещается произвольным образом в области видимости МП. В этот момент производится синхронная выборка образцовых координат \vec{x}_l^m , полученная с помощью лидара, установленного в начале локальной системы координат ведомого ТС и измерительных данных расстояний от маяка до каждого из МП

$$\vec{r}_l = [r_{1,l}, \dots, r_{n,l}, \dots, r_{N,l}]^T, \quad l = 1, \dots, L, \quad n = 1, \dots, N, \quad \text{где } L - \text{объем}$$

выборки, N – количество МП. Для определения вектора неизвестных параметров $\vec{w} = [\vec{x}_1 \dots \vec{x}_n^r \dots \vec{x}_N^r]^T$, где $\vec{x}_n^r = (x_n \ y_n \ z_n)^T$ – координаты n -ого МП в локальной системе координат ведомого ТС, используется минимизация функционала качества

$$\Phi(\vec{w}) = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N [(x_n - x_l^m)^2 + (y_n - y_l^m)^2 + (z_n - z_l^m)^2 - r_{l,n}^2]^2 \rightarrow \min_{\vec{w}}$$

с помощью метода Левенберга-Марквардта.

Были проведены натурные испытания ИИК до и после проведения процедуры автоматизированной калибровки. В качестве образцового измерительного канала использовался трехмерный лазерный сканер Velodyne HDL-32E, который располагался в центре координат мобильного робота типа «Вомбат» совместно с пространственной решеткой МП. Лазерный сканер Velodyne HDL-32E имеет высокое угловое разрешение по вертикали $1,33^\circ$ и горизонтали $0,08^\circ$, заявленная погрешность измерений дальности составляет 2 см.

Оценка траектории движения маяка с помощью фильтра Калмана со сглаживанием по модифицированному алгоритму Рауха-Тунга-Штрибеля до и после проведения процедуры калибровки, а также погрешности оценки положения ведущего в виде расстояний между оценкой траектории маяка и образцовой траекторией, полученной с помощью лазерного сканера, на плоскости $|\Delta_2|$ и в пространстве $|\Delta_3|$ во времени представлены на рисунке 3.

Результаты эксперимента в виде СКО оценки траектории маяка на плоскости и в пространстве сведены в таблицу 2.

Таблица 2. СКО оценки траектории маяка на плоскости и в пространстве при движении по прямоугольной траектории 3×6 м

	СКО($ \Delta_2 $), м	СКО($ \Delta_3 $), м
до калибровки	0,4589	0,6983
после калибровки	0,1401	0,2224

В результате проведённых испытаний было выявлено, что процедура автоматизированной калибровки позволила снизить погрешность оценки положения ведущего на 70% по сравнению с использованием номинальных характеристик комплекса, измеренных вручную.

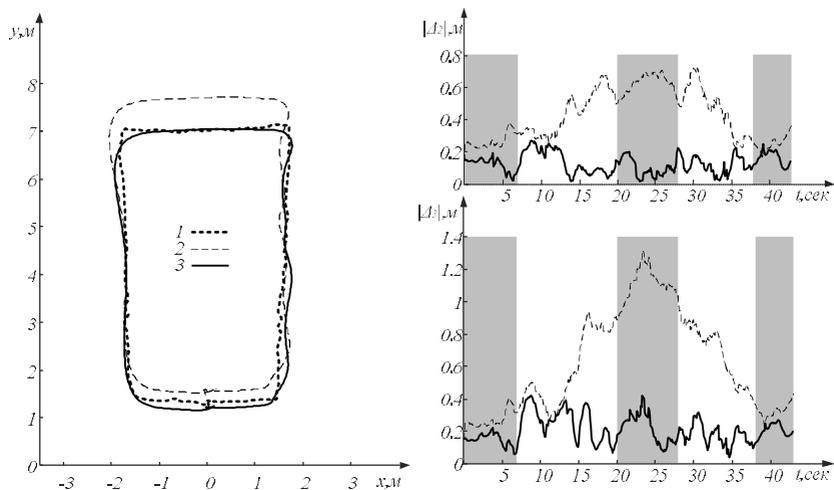


Рисунок 3. Оценка траектории маяка и погрешность в динамическом режиме работы ИИК, 3×6 м: 1 – образцовая траектория движения маяка, 2 – траектория движения маяка, вычисленная до проведения процедуры калибровки, 3 – траектория движения маяка, вычисленная после проведения процедуры калибровки

В четвертой главе рассматривается вопрос реализации и апробации ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС. В рамках диссертационной работы были разработаны несколько макетов и опытный образец ИИК, пример размещения которого на двух мобильных роботах типа «Вомбат» представлен на рисунке 4.

Многочисленная апробация работы ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС производилась на различных всероссийских и международных робототехнических испытаниях, где в качестве ведущего и ведомого ТС выступали как крупногабаритные, так и небольшие мобильные роботы. Испытания проводились в дневное и ночное время на полигонах с различным типом покрытия, а также внутри протяженных помещений и ангаров.



Рисунок 4. ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС: а – активный маяк, б – модуль приема ультразвукового сигнала, в – модуль синхронизации и сбора данных, г – пример положения ИИК на двух мобильных роботах типа «Вомбат»

Во время проведения ряда испытательных заездов присутствовали неблагоприятные факторы в виде различного рода осадков и тумана, а также искусственно созданная задымленность участка дороги. Среди основных испытаний можно выделить:

- полевые испытания беспилотных транспортных средств на полигоне Ногинского спасательного центра МЧС, в рамках которых ИИК устанавливался на мобильную робототехническую платформу с четырьмя независимыми поворотными ведущими мотор-колесами;
- динамический показ образцов робототехнических комплексов в рамках Международной выставки «День инноваций Министерства обороны Российской Федерации – 2015», в рамках которого ИИК устанавливался на автономную транспортную платформу повышенной проходимости MAPC A-800;
- европейские испытания сухопутных роботов M-ELROB 2016 и M-ELROB 2018, в рамках которых ИИК устанавливался на автономную транспортную платформу повышенной проходимости MAPC A-800 и на мобильный робот типа «Вомбат».

Во время испытаний было выявлено, что большое влияние на точность воспроизведения необходимого маршрута беспилотным ТС оказывали система локализации и система управления движением роботизированного ТС, что сказывалось на оценке максимального отклонения траектории ведомого ТС от траектории движения ведущего.

Помимо этого была выполнена составная часть опытно-конструкторской работы «Разработка и изготовление макета системы следования за маяком» для АО «ВНИИ «Сигнал», в рамках которой помимо статических и динамических испытаний, проведенных на территории АО «ВНИИ «Сигнал» в г. Ковров, были проведены климатические испытания, подтверждающие устойчивость заявленных решений к воздействию атмосферных осадков и низких температур.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан алгоритм восстановления траектории движения ведущего во время движения в составе автономного каравана на основе модифицированного метода Рауха-Тунга-Штрибеля, снижающий СКО погрешности восстановления на 16% по сравнению с базовыми алгоритмами.
2. Разработан алгоритм компенсации систематической составляющей погрешности определения взаимного положения ведущего и ведомого в составе автономного каравана по данным ГНСС на основе образцового ультразвукового измерительного канала.
3. Разработан комплексный алгоритм оценки положения и траектории ведущего во время движения в составе автономного каравана, использующий спорадическую компенсацию систематической составляющей погрешности ГНСС и снижающий систематическую погрешность на 45%.
4. Разработан метод автоматизированной калибровки ИИК определения взаимного положения ведущего и ведомого ТС, снижающий погрешность оценки положения ведущего на 70% по сравнению с использованием номинальных характеристик комплекса.
5. Создан и апробирован опытный образец ИИК, отличающийся возможностью масштабирования количества подключенных модулей приема, что позволяет устанавливать систему на любой тип роботизированного ТС.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. Голь С.А., Захарова Е.А. Комбинированная оценка взаимного положения ведущего и ведомого транспортного средства по данным ультразвуковых приемников и ГНСС-модуля // Интеллектуальные системы в производстве. №1 (20). С. 4-12. 2022.

2. Захарова Е.А. Структура информационно-измерительного комплекса определения взаимного положения ведущего и ведомого транспортного средства и его калибровка // Интеллектуальные системы в производстве. №1 (20). С. 13-21. 2022.

Работы, входящие в базы данных Web of Science и Scopus:

3. S Goll, E Zakharova. An active beacon-based leader vehicle tracking system // Acta IMEKO. №. 4. (8). С. 33-40. 2019.
4. S Goll, E Zakharova. Calibration Procedure for the Beacon-based Tracking System to be used for Mobile Robot Convoying // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). IEEE. С. 1-5. 2019.
5. S Goll, E Zakharova. An Active Beacon-Based Tracking System To Be Used For Mobile Robot Convoying // 21th International Symposium on Measurement and Control in Robotics. С. 18-24. 2018.

Работы, опубликованные в других изданиях:

6. Голь С.А., Борисов А.Г., Леушкин В.С., Захарова Е.А. Программно-аппаратный комплекс слежения за маяком // Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2017. С. 587-590. 2017
7. Захарова Е.А. Математическая модель системы слежения мобильного робота за активным маяком // Новые информационные технологии в научных исследованиях. С. 99-100. 2018
8. Голь С.А., Захарова Е.А. Система слежения спасательного мобильного робота за активным маяком // Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2018. С. 485-488. 2018

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612136. Программа управления сенсорно-вычислительным комплексом "Локатор-УС" / Захарова Е.А., Голь С.А., Леушкин В.С., 2016.

Захарова Елена Александровна

**ИНФОРМАЦИОННО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ
ВЕДУЩЕГО И ВЕДОМОГО ТРАНСПОРТНОГО
СРЕДСТВА**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____

Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.