

Основные подходы в разработках систем дистанционного управления при прототипировании автономных транспортных средств

С.А. Кизиллов✉, М.С. Никитенко, Д.Ю. Худоногов, Я.В. Попинако, Д.О. Верховцев

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Кемерово, Российская Федерация

✉sergkizilov@gmail.com

Резюме: В статье приведены результаты обзора работ зарубежных и отечественных исследователей по теме дистанционного управления автономными транспортными средствами. Рассмотрены условия, при которых использование дистанционного управления является необходимым, представлены два основных вида дистанционного управления – ручное управление и помощь в принятии решения системой автономного вождения. Выделены основные элементы системы дистанционного управления. Кратко описаны основные требования к каждому из элементов, а также применяемые способы для их реализации. Определены состав элементов и основные требования к системе дистанционного управления для прототипа автономного транспортного средства.

Ключевые слова: автономное транспортное средство, система управления, телеуправление, дистанционное управление, пульт дистанционного управления, видеоизображение, телеметрия, ассистивное телеуправление

Благодарности: Исследование выполнено в рамках КНТП, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р. по мероприятию «Разработка системы управления автономными транспортными средствами на основе проецируемой траектории движения» (Соглашение от 28.09.2022 №075-15-2022-1199).

Для цитирования: Кизиллов С.А., Никитенко М.С., Худоногов Д.Ю., Попинако Я.В., Верховцев Д.О. Основные подходы в разработках систем дистанционного управления при прототипировании автономных транспортных средств. *Горная промышленность*. 2023;(S2):114–117. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-114-117>

Basic approaches in designing remote control systems when prototyping autonomous vehicles

S.A. Kizilov✉, M.S. Nikitenko, D.Yu. Khudonogov, Ya.V. Popinako, D.O. Verkhovtsev

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo,
Russian Federation

✉sergkizilov@gmail.com

Abstract: The article presents the results of a reviewing works by foreign and Russian researchers dedicated to remote control of autonomous vehicles. It discusses the conditions that make the use of remote control necessary, and presents two main types of remote control, i.e. manual control and decision making assistance by the autonomous driving system. The key components of a remote control system are identified. The main requirements for each of the elements are briefly described, as well as the methods used to implement them. Composition of the components and basic requirements to the remote control system have been defined for a prototype of an autonomous vehicle.

Keywords: autonomous vehicle, control system, telecontrol, remote control, remote control unit, video image, telemetry, assistive telecontrol

Acknowledgments: The research was performed within the framework of the Integrated Scientific and Technical Program approved by the Order of the Government of the Russian Federation No.1144-r as of 11.05.2022 under the 'Development of a control system for autonomous vehicles based on projected travel path' project (Agreement No.075-15-2022-1199 as of 28.09.2022).

For citation: Kizilov S.A., Nikitenko M.S., Khudonogov D.Yu., Popinako Ya.V., Verkhovtsev D.O. Basic approaches in designing remote control systems when prototyping autonomous vehicles. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):114–117. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-114-117>

Введение

В современной горнодобывающей индустрии на второй квартал 2022 г. применяется более тысячи автономных карьерных самосвалов, и их количество будет только увеличиваться [1; 2], что показывает актуальность развития технологий дистанционного управления. Разработку новой системы автономного вождения грузовых автомобилей логичнее всего производить на масштабных моделях для без-

опасности и экономии средств, при этом реализуя функции основных систем на прототипах.

Результаты

Автономный карьерный самосвал – это система, состоящая из двух частей: автономного транспортного средства (далее – АТС) и пульта управления, при этом не имеет значения, используется ли одно АТС или флот из десятков

единиц¹ [3]. Пульт управления АТС предназначен как для общего контроля и диспетчеризации флота АТС, так и для удаленного управления оператором отдельным АТС в режиме реального времени [3]. Удаленное управление АТС оператором требуется в случае отказа систем автономного вождения [4], помощи при проведении опасных маневров (например, заезд в зону сервисного обслуживания) и при возникновении нештатных дорожных ситуаций [5]. Следует отметить, что современные интеллектуальные системы управления АТС имеют ограниченный набор способов реагирования на обнаруживаемые ими нештатные дорожные ситуации [5], все они имеют максимальный уровень автономности 4 из 5, описанных в [6]², где 5-й уровень автономности – способность АТС функционировать в любое время, в любых условиях без вмешательства человека [7; 8]. Исходя из опубликованных исследований [7; 8] АТС не достигнут 5-го уровня автономности ранее 2030–2040 гг. Таким образом, для обеспечения эксплуатации АТС на сегодняшний день, удаленный контроль оператора и возможность дистанционного управления необходимы [5]. Система дистанционного управления является одной из подсистем, которую необходимо разработать при создании нового АТС. При этом важно исследовать способы ее реализации, описанные в научной литературе.

Дистанционное управление АТС (телеуправление) – это технология, обеспечивающая удаленный доступ к техническому устройству для передачи управляющих воздействий [9]. Согласно определению ГОСТ 26.005–82, система дистанционного управления АТС относится к телемеханическим системам. Выделяют два основных вида телемеханических систем: разомкнутые, которые не имеют автоматического контроля за состоянием исполнительных механизмов при воздействии на них с пульта оператора, и замкнутые, в которых воздействие на систему телеуправления производится с непосредственным учетом реального состояния исполнительных механизмов [10].

Для взаимодействия оператора с АТС применяются два вида телеуправления: полное ручное и помощь в управлении системе автономного вождения [4; 5; 11]. В первом случае оператор берет на себя всё управление АТС, ориентируясь на показания бортовых систем машинного зрения, видеокамер, датчиков, во втором – оператор контролирует работу системы автономного вождения, оценивает принятые ей решения исходя из складывающейся дорожной ситуации, помогает принять верные решения или исправить допущенные ошибки, ориентируясь на те же данные, что и при ручном управлении [4; 5]. Данный вид телеуправления в зарубежной литературе называется ассистивным (assistive telecontrol). Он дает возможность оператору выступать в роли навигатора, указывая на видеоизображении или навигационной карте точку, которую АТС достигает самостоятельно, используя систему автономного вождения [12]. При этом ручное телеуправление может быть построено как на основе замкнутой (предпочтительно), так и на основе разомкнутой телемеханической системы. При ассистивном телеуправлении дистанционный контроль будет построен на основе замкнутой телемеханической системы.

Также важным аспектом при разработке любой системы телеуправления АТС является ситуационная осведомленность оператора управления [4; 5]. Получение достаточной

для принятия правильного решения информации об окружающей обстановке в зоне действия АТС является одной из задач при разработке системы телеуправления [13].

Сама система телеуправления АТС может быть разделена на три основные части: пульт управления, устройства для дистанционного управления непосредственно на борту АТС и система передачи данных [9; 14].

Пульт дистанционного контроля и управления АТС должен включать в свой состав: устройства для формирования управляющего сигнала, задающего скорость и вектор движения АТС, а также выполнение дополнительных операций, устройства, обеспечивающие ситуационную осведомленность оператора [5; 11; 14], и систему приема-передачи данных. В качестве устройств для формирования управляющего сигнала, задающего скорость, вектор движения, могут использоваться как джойстик или его аналог, так и полноценный кокпит, имитирующий органы управления транспортного средства [5]. Ситуационная осведомленность оператора складывается из информации о дорожной обстановке и состоянии АТС, соответственно, имеется два вида данных, которые необходимо отображать перед оператором: видеоизображение с дорожной обстановкой и данные с датчиков АТС. Существует несколько подходов, как предоставить достаточную ситуационную осведомленность оператору АТС. Первый – вывод видеоизображения на экран или несколько экранов перед оператором совместно с информацией о состоянии АТС. Вторым – использование для вывода всей информации VR-гарнитуры, при этом часто формируется трехмерное или круговое панорамное изображение, характеризующее дорожную ситуацию вокруг АТС [5; 9; 12; 14]. Третий способ – комбинация первых двух с устройствами, обеспечивающими физическую обратную связь технических систем АТС с устройствами формирования управляющего сигнала, задающего скорость и вектор движения (формирование на органах управления ответной реакции, аналогичной возникающей на реальных органах управления: усилие на руле, а также связь с положением колес, изменение наклона в пространстве кокпита управления, имитация воздействия гидравлической жидкости на джойстики, управляющие гидросистемами) [4; 11].

Набор устройств, установленных на АТС и обеспечивающих дистанционное управление, зависит от конфигурации пульта оператора, но обычно – это одна или несколько цифровых видеокамер, устройство для приема-передачи данных, модуль захвата данных телеметрии с заданных узлов АТС, их кодирование и вывод в систему передачи информации. В зависимости от способа формирования ситуационной осведомленности оператора, на пульте управления может меняться тип видеокамер, их количество и состав датчиков, с которых собираются данные телеметрии [5; 15]. Важным параметром также является быстродействие программно-аппаратных комплексов обработки информации, видеоданных и телеметрии для подготовки к отправке системой передачи данных на внешний пульт управления.

Система передачи данных обеспечивает цифровую двустороннюю связь между АТС и пультом управления, при этом должны возникать минимальные задержки как при передаче видеоизображения с АТС на пульт оператора, так и в обратном направлении [5]. Соответственно, для обеспечения передачи информации между пультом оператора и АТС в режиме дистанционного управления с минимальными задержками возможно применение только современных стандартов беспроводной связи (LTE, 5G или Wi-Fi 6).

1 Autonomous Haulage System (AHS). Hitachi Construction Machinery. 2023. Available at: <https://www.hitachicm.com/global/en/solutions/solution-linkage/ahs/>

2 Surface Vehicle Recommend Practice. Technical report, SAE International. SAE International. 2013. Available at: <https://www.sae.org/standards>

Согласно [11; 16], задержка в формировании и передаче сигнала между АТС и пультом оператора в 10–20 мс начинает влиять на скорость реакции оператора, а увеличение задержки с 8,3 до 225 мс снижает скорость реакции оператора на 64 % и увеличивает вероятность ошибки в управлении на 214% [11; 17]. Из вышеизложенного сделан вывод, что задержка в формировании и передаче сигнала может возникать в любом из трех компонентов системы дистанционного управления. На практике встречается общая задержка сигнала: сначала происходит запаздывание при кодировании видеосигнала от видеокамер на АТС, затем при его передаче на пульт управления и его декодирования [18]. Важно отметить, что задержка в передаче телеметрии не так критично сказывается на ситуационной осведомленности оператора, как задержка видеосигнала [18]. Задержка также возникает при кодировании сигнала от взаимодействия оператора с органами управления и его последующем декодировании для передачи к исполнительным органам. Следует отметить, что проведенные исследования показывают практически полное отсутствие влияния снижения частоты кадров в передаваемом видеосигнале с 25 кадров/с до 10 кадров/с на скорость реакции оператора [19], при этом операторы значительно быстрее уставали при длительной работе с пониженной частотой кадров в видеосигнале, так как им требовалась большая концентрация, чем при работе с видеосигналом на частоте 25 кадров/с. Также, в [19] показано, что даже при частоте 5 кадров/с между кадрами АТС на скорости 30 км/ч проезжает 1,16 м, тогда как при задержке в передаче видеоизображения (отставание картинки) всего в 250 мс пройденное без контроля расстояние возрастает практически в 2 раза – до 2,08 м.

Выводы

В результате анализа сформированы обобщенные требования к системе дистанционного управления для масштабного прототипа АТС:

- система дистанционного управления должна состоять из рабочего места оператора с устройствами, обеспечивающими ситуационную осведомленность, формирование управляющего сигнала (задающего скорость и вектор движения);
- система должна включать в свой состав оборудование для высокоскоростной беспроводной связи между АТС и пультом оператора;
- АТС должно быть оснащено устройствами, формирующими ситуационную осведомленность оператора, устройствами, обеспечивающими прием управляющего сигнала с пульта управления и передающими их на органы управления АТС;
- должна обеспечиваться малая (менее 200 мс) задержка при формировании и передаче данных от АТС на пульт управления и обратно за счет подбора компонентов системы дистанционного управления и алгоритмов ее работы;
- в качестве видеокамеры, формирующей данные для ситуационной осведомленности оператора, может быть использована веб-камера, обеспечивающая передачу видео с разрешением не ниже 1280x720 пикселей и частотой кадров не ниже 20 кадров/с;
- телемеханическая система дистанционного управления для масштабной модели прототипа АТС может быть построена по замкнутому типу, учитывающему максимальные углы поворота рулевого механизма во избежание его повреждения в случае ошибки оператора.

Список литературы

1. Writer S. *Global autonomous mining truck population tops thousand mark, to reach 1,800 by 2025 – report*. May 18, 2022. Available at: <https://www.mining.com/global-autonomous-mining-truck-population-tops-thousand-mark-to-reach-1800-by-2025-report/>
2. Никитенко М.С., Кизилов С.А., Худоногов Д.Ю. Анализ подходов к управлению автономными транспортными средствами. *Современные наукоемкие технологии*. 2022;(12-2):278–283. Режим доступа: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39472>
3. Hamada T., Saito S. Autonomous Haulage System for Mining Rationalization. *Hitachi review*. 2018;67(1):86–87. Available at: https://www.hitachi.com/rev/archive/2018/r2018_01/10a07/index.html
4. Mutzenich C. *Situation Awareness of Remote Vehicle Operators: PhD thesis*. Royal Holloway, London; 2022.
5. Biletska O., Kurtz G., Zadek H., Kersten W., Jahn C., Blecker T., Ringle C.M. Operation control center for automated vehicles: Conceptual design. *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*. 2022;33:731–752. <https://doi.org/10.15480/882.4702>
6. Endsley M.R., Kiris E.O. The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors*. 1995;37(2):381–394. <https://doi.org/10.1518/001872095779064555>
7. Underwood S. *Connected, and Electric Vehicle Systems for Sustainable Transportation. Technical report*. University of Michigan; 2014. Available at: <https://press.umich.edu/Series/T/Technical-Reports>
8. Lalli M. *Autonomes Fahren Und Die Zukunft Der Mobilität*. 2nd ed. Heidelberg: sociotrend; 2019. 120 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61812-7>
9. Sherafatian A. *Teleoperation of remote controlled toy cars in VR, PhD thesis*. University of Tartu Institute of Computer Science Computer Science Curriculum, Tartu; 2022.
10. Кузьмин И.В. *Проектирование телемеханических систем контроля и управления*. Харьков; 1967. 75 с.
11. Moniruzzaman M., Rassau A., Chai D., Islam S.M.S. Teleoperation methods and enhancement techniques for mobile robots: A comprehensive survey. *Robotics and Autonomous Systems*. 2012;150:103973. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103973>
12. Кугуракова В.В., Хафизов М.Р., Кадыров С.А., Зыков Е.Ю. Удаленное управление роботизированным устройством с использованием технологий виртуальной реальности. *Программные продукты и системы*. 2022;(3):348–361. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.139.348-361>
13. Small N. *Assigned responsibility: An architecture for mixed control robot teleoperation, PhD thesis*. Murdoch University, Perth; 2016.
14. Bout M. *A Head-mounted display to support remote operators of shared automated vehicles, PhD thesis*. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm; 2017.
15. Majstorovic D., Hoffmann S., Pfab F., Schimpe A., Wolf M.-M., Diermeyer F. Survey on teleoperation concepts for automated vehicles. In: *Conference: 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. Cornell University, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.08876>
16. Ellis S., Mania K., Adelstein B. Generalizeability of Latency Detection in a Variety of Virtual Environments. *Sage Journals Home*. 2004;48(23):2632–2636. <https://doi.org/10.1177/154193120404802306>
17. MacKenzie I.S., Ware C. Lag as a determinant of human performance in interactive systems. In: *Human-Computer Interaction, INTERACT'93, IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction*. Amsterdam, Netherlands, 24–29 April, 1993, pp. 488–493. <https://doi.org/10.1145/169059.169431>

18. Storms J. *Modeling and Improving Teleoperation Performance of Semi-Autonomous Wheeled Robots*, PhD thesis. University of Michigan, Michigan; 2017.
19. Bodtl O. *Teleoperation of autonomous vehicle with 360° camera feedback*, PhD thesis. Chalmers University of Technology, Gothenburg; 2016.

References

1. Writer S. *Global autonomous mining truck population tops thousand mark, to reach 1,800 by 2025 – report. May 18, 2022*. Available at: <https://www.mining.com/global-autonomous-mining-truck-population-tops-thousand-mark-to-reach-1800-by-2025-report/>
2. Nikitenko M.S., Kizilov S.A., Khudonogov D.Yu. Analysis of approaches to autonomous vehicle control. *Modern High Technologies*. 2022;(12-2):278–283. (In Russ.) Available at: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39472>
3. Hamada T., Saito S. Autonomous Haulage System for Mining Rationalization. *Hitachi review*. 2018;67(1):86–87. Available at: https://www.hitachi.com/rev/archive/2018/r2018_01/10a07/index.html
4. Mutzenich C. *Situation Awareness of Remote Vehicle Operators: PhD thesis*. Royal Holloway, London; 2022.
5. Biletska O., Kurtz G., Zadek H., Kersten W., Jahn C., Blecker T., Ringle C.M. Operation control center for automated vehicles: Conceptual design. *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*. 2022;33:731–752. <https://doi.org/10.15480/882.4702>
6. Endsley M.R., Kiris E.O. The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors*. 1995;37(2):381–394. <https://doi.org/10.1518/001872095779064555>
7. Underwood S. *Connected, and Electric Vehicle Systems for Sustainable Transportation. Technical report*. University of Michigan; 2014. Available at: <https://press.umich.edu/Series/T/Technical-Reports>
8. Lalli M. *Autonomes Fahren Und Die Zukunft Der Mobilität*. 2nd ed. Heidelberg: sociotrend; 2019. 120 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61812-7>
9. Sherafatian A. *Teleoperation of remote controlled toy cars in VR*, PhD thesis. University of Tartu Institute of Computer Science Computer Science Curriculum, Tartu; 2022.
10. Kuzmin I.V. *Design of telemechanical control and management systems*. Kharkov; 1967. 75 p. (In Russ.)
11. Moniruzzaman M., Rassau A., Chai D., Islam S.M.S. Teleoperation methods and enhancement techniques for mobile robots: A comprehensive survey. *Robotics and Autonomous Systems*. 2012;150:103973. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103973>
12. Kugurakova V.V., Khafizov M.R., Kadyrov S.A., Zykov E.Yu. Remote control of a robotic device using virtual reality. *Software & Systems*. 2022;(3):348–361. (In Russ.) <https://doi.org/10.15827/0236-235X.139.348-361>
13. Small N. *Assigned responsibility: An architecture for mixed control robot teleoperation*, PhD thesis. Murdoch University, Perth; 2016.
14. Bout M. *A Head-mounted display to support remote operators of shared automated vehicles*, PhD thesis. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm; 2017.
15. Majstorovic D., Hoffmann S., Pfab F., Schimpe A., Wolf M.-M., Diermeyer F. Survey on teleoperation concepts for automated vehicles. In: *Conference: 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. Cornell University, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.08876>
16. Ellis S., Mania K., Adelstein B. Generalizeability of Latency Detection in a Variety of Virtual Environments. *Sage Journals Home*. 2004;48(23):2632–2636. <https://doi.org/10.1177/154193120404802306>
17. MacKenzie I.S., Ware C. Lag as a determinant of human performance in interactive systems. In: *Human-Computer Interaction, INTERACT'93, IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction*. Amsterdam, Netherlands, 24–29 April, 1993, pp. 488–493. <https://doi.org/10.1145/169059.169431>
18. Storms J. *Modeling and Improving Teleoperation Performance of Semi-Autonomous Wheeled Robots*, PhD thesis. University of Michigan, Michigan; 2017.
19. Bodtl O. *Teleoperation of autonomous vehicle with 360° camera feedback*, PhD thesis. Chalmers University of Technology, Gothenburg; 2016.

Информация об авторах

Кизилев Сергей Александрович – старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: sergkizilov@gmail.com

Никитенко Михаил Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: nilegion@mail.ru

Худоногов Данила Юрьевич – научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: admolv@gmail.com

Попинак Ярослав Владимирович – инженер, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: popinakoya@gmail.com

Верховцев Даниил Олегович – младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: daniluk201056@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 09.08.2023

Поступила после рецензирования: 04.09.2023

Принята к публикации: 05.09.2023

Information about the authors

Sergey A. Kizilov – Scientific fellow, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: sergkizilov@gmail.com

Mikhail S. Nikitenko – Cand. Sci. (Eng.), Head of laboratory, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Danila Yu. Khudonogov – Scientific Researcher, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: admolv@gmail.com

Yaroslav V. Popinako – Engineer, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: popinakoya@gmail.com

Daniil O. Verkhovtsev – Junior Scientific Fellow, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: daniluk201056@gmail.com

Article info

Received: 09.08.2023

Revised: 04.09.2023

Accepted: 05.09.2023