



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 656.25
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-1>

Погрешности измерения расстояния до препятствия средствами технического зрения и прогноза пути торможения в беспилотных системах управления движением поездов



Леонид БАРАНОВ



Пётр БЕСТЕМЬЯНОВ



Екатерина БАЛАКИНА



Андрей ОХОТНИКОВ

Леонид Аврамович Баранов¹, Пётр Филимонович Бестемьянов², Екатерина Петровна Балакина³, Андрей Леонидович Охотников⁴

^{1,2,3} Российский университет транспорта, Москва, Россия.

⁴ Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия.

✉ ³ balakina_e@list.ru.

АННОТАЦИЯ

Системы технического зрения являются источниками информации о препятствии, оказавшемся на пути, при беспилотном управлении движением поездов. По полученной информации системой управления движением принимается решение о включении режима торможения с целью предотвращения наезда на препятствие.

В соответствии с международным и отечественным опытом и нормами необходимо обеспечить вероятность опасного отказа, в данном случае – вероятность наезда на препятствие, не более 10^{-9} при доверительной вероятности 0,95 по SIL-4 (ГОСТ-Р61508). Учитывая наличие погрешности измерения расстояния до препятствия системой технического зрения и погрешности расчёта тормозного пути, требуется определить координату точки начала торможения при обнаружении предмета на пути таким образом, чтобы обеспечить остановку поезда до препятствия с вероятностью, определяемой в соответствии с SIL-4.

Особенностью решаемой задачи оценки погрешностей измерения расстояния до препятствия и расчёта тормозного пути является необходимость определения оценок их максимальных величин и разработки алгоритма использования этих оценок таким образом, чтобы вероятность наезда не превышала нормированного значения.

Ключевые слова: транспорт, железнодорожный транспорт, техническое зрение, погрешности измерения расстояния до препятствия, беспилотные системы управления движением, расчёт тормозного пути, оценка погрешности.

Приведена методика определения максимальной величины погрешности измерения расстояния до места препятствия, вероятность превышения которой довольно мала (от 10^{-2} до 10^0). Предложен алгоритм многократных измерений расстояния до препятствия с выбором минимального результата измерений для принятия решения о начале торможения, обеспечивающий выполнение нормативного показателя вероятности столкновения поезда с препятствием согласно SIL-4. Разработана методика оценки погрешности расчёта тормозного пути, обеспечивающая совместно с алгоритмом многократных измерений системой технического зрения расстояния до препятствия, нормативный показатель согласно SIL-4. Показана необходимость функционирования второго канала технического зрения из-за наличия кривых в пути следования. Обоснована необходимость использования алгоритмов многократных измерений до препятствия по второму каналу, расположенному вне поезда. Отмечено, что описанные в данной статье способы выбора максимальных значений случайных погрешностей измерений и расчётов, превышение величин которых имеет весьма малую вероятность, могут быть использованы в различных прикладных задачах управления движением на транспорте.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сирius», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001.

Для цитирования: Баранов Л. А., Бестемьянов П. Ф., Балакина Е. П., Охотников А. Л. Погрешности измерения расстояния до препятствия средствами технического зрения и прогноза пути торможения в беспилотных системах управления движением поездов // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 6 (97). С. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-1>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей функцией автоматической интеллектуальной транспортной системы является восприятие окружающей среды и способность различать наличие препятствий, в том числе в процессе движения [1–3]. Отсюда проистекают основные области применения технического зрения: визуальный контроль и роботизированное зрение [1; 4]. Для решения задач обнаружения препятствий в указанных областях используется множество подходов. Наиболее поверхностными являются «качественные» алгоритмы, они возвращают только ответы «да»/«нет» относительно наличия препятствий в поле зрения [5]. Ещё одним распространённым подходом к обнаружению препятствий являются аналитические и статистические методы, предполагающие оценку движения и создание карт на основе статистической информации [6]. В последние годы большинство алгоритмов стали использовать стереовидение или 2D/3D сенсорные технологии. Основным их плюсом является возможность определения различных параметров препятствия, например, высоты препятствия над землёй и расстояния до него [5; 7; 8]. В основе стереовидения лежат методы спектрального анализа [9], генетические алгоритмы и нейронные сети [10].

В беспилотных системах управления движением поездов используется техническое зрение для предотвращения столкновения движущегося поезда с препятствием, оказавшимся на пути [11]. Устройство управления получает информацию о расстоянии до препятствия и на фиксированном расстоянии формирует команду на срабатывание звукового сигнала предупреждения для того, чтобы препятствие было убрано. В случае, когда препятствие оказывается на расстоянии, равном пути служебного (или экстренного) торможения, формируется команда начала торможения. Целью безопасного управления является обеспечение остановки поезда до препятствия. Момент формирования команды торможения выбирается из условия равенства рассчитанного пути торможения $S_{\text{торм}}$ поезда, движущегося со скоростью V , и расстояния, измеренного системой технического зрения до места препятствия:

$$S_{\text{торм}}(V) = L_{\text{изм}} \quad (1)$$

Вместе с тем, рассчитанная величина тормозного пути $S_{\text{торм}}(V)$ может отличаться от реальной из-за всегда имеющихся упрощений в модели поезда, используемой при расчёте, на-

личия случайных возмущений, приводящих к изменению сопротивления движению поезда, погрешностей в задании плана и профиля пути в зоне движения и т.д. Измерение расстояния до места препятствия в системе технического зрения также реализуется со случайной погрешностью.

Пусть $\Delta S_{\text{торм}}(V)$ и ΔL – абсолютные погрешности расчёта тормозного пути и измерения расстояния до места препятствия соответственно; $S_{0\text{торм}}(V)$ и L_0 действительные значения тормозного пути и расстояние до препятствия соответственно. Тогда исходя из условия обеспечения безопасности, выбор момента начала торможения определяется как:

$$S_{0\text{торм}}(V) = L_0, \quad (2)$$

и выражение (1) преобразуется следующим образом:

$$S_{0\text{торм}}(V) + \Delta S_{\text{торм}}(V) \leq L_0 + \Delta L. \quad (3)$$

Худшим с точки зрения безопасности движения является ситуация, когда $\Delta S_{\text{торм}}(V) < 0$, $\Delta L > 0$, т.е. при выполнении условия (1) в то время как рассчитанный тормозной путь меньше, чем реализуемый, а измеренное расстояние до объекта больше, чем реальное, произойдёт столкновение поезда с препятствием. Отсюда оценкой сверху вероятности столкновения поезда и препятствия при известных законах распределения плотности вероятности случайных величин $\Delta S_{\text{торм}}(V)$ и $\Delta L(L)$, при известных V и L является:

$$P_{\text{ст}}(V, L) = \int_{-\infty}^0 f(\Delta S_{\text{торм}}|V) d\Delta S_{\text{торм}}(V) \int_0^{\infty} f(\Delta L|L) d\Delta L, \quad (4)$$

где $f(\Delta S_{\text{торм}}|V)$ и $f(\Delta L|L)$ – функции распределения условных плотностей вероятности $\Delta S_{\text{торм}}(V)$ и $\Delta L(L)$. Эту оценку можно уточнить, определив при известных функциях плотностей вероятностей статистически независимых случайных величин $\Delta S_{\text{торм}}|V$ и $\Delta L(L)$ функцию распределения плотности вероятности $\phi(z)$ случайной величины $Z = \Delta S_{\text{торм}} + \Delta L$ при фиксированных V и L .

Тогда:

$$P_{\text{см}} = \int_0^{\infty} \phi(z|V, L) dz.$$

Эту величину можно ещё раз оценить сверху:

$$P_{\text{макс.ст}} = \max P_{\text{ст}}(V, L). \quad (5)$$

Определение функций распределения плотностей вероятностей по результатам обработки результатов многочисленных расчётов и измерений, когда существенны оценки вероятности опасной ситуации порядка 10^{-4} – 10^{-8} , требуют





высокой достоверности в описании «хвостов» распределений, что составляет известные трудности. Поэтому в данной работе, *целью* которой является решение задачи оценки погрешностей измерения расстояния до препятствия и расчёта тормозного пути, определения оценок их максимальных величин и разработки алгоритма использования этих оценок таким образом, чтобы вероятность наезда не превышала нормированного значения, использован другой способ решения.

Для уменьшения вероятности столкновения поезда с препятствием можно использовать известный приём, заменив выражение в условиях формирования команды на начало торможения следующим:

$$S_{\text{торм}}(V) + \Delta S_{\text{max}} = L_{\text{изм}} - \Delta L_{\text{max}}, \quad (6)$$

где $\Delta S_{\text{max}} = \max \Delta S_{\text{торм}}(V)$ – максимальное значение модуля отрицательной погрешности расчёта и $\Delta L_{\text{max}} = \max \Delta L_0(L)$ – максимальное значение положительной погрешности измерения.

По существу, это условие определяет длину «защитного участка пути» перед препятствием, которое позволит, как будет показано далее, обеспечить требуемый показатель безопасности. Вместе с тем, определение величин $S_{\text{торм max}}$ и ΔL_{max} также связано с вероятностными оценками этих величин, которые, в свою очередь, определяют оценку вероятности столкновения поезда с препятствием. Особенностью решения этой задачи является то, что допустимые оценки безопасности определяются очень малыми значениями.

Выбор максимальных значений случайных величин при всегда имеющих место ограничениях на число испытаний является задачей теории вероятности и математической статистики. Особенностью использования этого математического аппарата для решаемой задачи является малая допустимая вероятность превышения значения случайной величины выбранного её максимального значения [12].

В условиях, когда длина защитного участка выбирается равной $S_{\text{max}} + \Delta L_{\text{max}}$, столкновение возможно, когда сумма погрешностей превышает сумму максимальных значений этих погрешностей, выбранных с рассчитанной вероятностью при фиксированном доверительном интервале. Следовательно, вероятность опасной ситуации $P_{\text{max ст}}$ можно оценить сверху как произведение вероятностей событий $\Delta S_{\text{торм}}(V) > S_{\text{max}}$ и $\Delta L(L) > L_{\text{max}}$:

$$P_{\text{max ст}} < P[(\Delta S_{\text{торм}}(V)) > S_{\text{торм max}}] \cdot P[\Delta L(L) > \Delta L_{\text{max}}]. \quad (7)$$

Отметим, что задача выбора длины «защитного» участка по заданной допустимой вероятности опасного события требует своего решения также при анализе систем обеспечения безопасности движения поездов на перегонах при наличии машиниста [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика оценки максимальной погрешности измерений

Рассмотрим подход к оценке максимальной погрешности $\Delta L_{\text{max}}(L)$ при определении расстояния между движущимся поездом и предметом на пути. Знание максимальной погрешности позволяет выбрать точку начала торможения движущегося поезда, обеспечивающую с заданной нормированной вероятностью отсутствие столкновения поезда с препятствием. Информация о случайной величине погрешности измерения расстояния содержится в законе распределения плотности вероятности этой величины, полученного по результатам статистической обработки экспериментальных данных [14]. Так как вероятность исхода допускается с вероятностью 10^{-8} (для SIL-4), то определение вероятности максимальной величины погрешности в этих условиях соответствует «хвостам» распределения. Приближённый метод определения доверительного интервала для вероятности на основе замены закона распределения частоты гауссовским неприменим, так как величины вероятностей очень малы. В этих условиях можно использовать следующий приём [12]. Пусть в результате n опытов величина погрешности ΔL_{max} ни разу не была зафиксирована. Обозначим это событие как B . Требуется найти максимальное значение вероятности того, что $\Delta L > L_{\text{max}}$, которая совместима с наблюдаемым в опыте событием B .

Введём обозначения: p – вероятность того, что $\Delta L > \Delta L_{\text{max}}$; p_m – максимальное значение p . Диапазон доверительного интервала для p составляет $0 \leq p \leq p_m$. Несовместимы с наблюдаемым в опыте событием будут те значения p , для которых вероятность события B меньше, чем $\lambda = 1 - \beta$, где β – доверительный интервал.

Для любой вероятности p вероятность того, что при n измерений не было результата $\Delta L > \Delta L_{\text{max}}$ определяется выражением $P(B) = (1 - p)^n$. При $P(B) = \lambda$ получим уравнение для p_{max} :

$$(1 - p_{\text{max}})^n = 1 - \beta. \quad (8)$$

Откуда:

$$p_{\text{max}} = 1 - \sqrt[n]{1 - \beta}.$$

Число экспериментов (n) для определения p_{\max} с заданным доверительным интервалом [выполнено авторами]

$p_{\max} = 10^{-2}$		$p_{\max} = 10^{-4}$		$p_{\max} = 10^{-6}$	
n	β	n	β	n	β
229	0,9	23025	0,9	2302534	0,9
459	0,99	46050	0,99	4605168	0,99
688	0,999	69075	0,999	6907752	0,999

При заданных допустимых вероятностях того, что погрешность $\Delta L \geq \Delta L_{\max}$ и доверительном интервале β из (8) можно получить какое число (n) экспериментов, в которых ни разу не наблюдалось событие $\Delta L > \Delta L_{\max}$, должно быть проведено, чтобы считать величину p_{\max} не противоречащей результатам эксперимента:

$$n = \frac{\lg(1-\beta)}{\lg(1-p_{\max})}.$$

Результаты расчёта числа экспериментов с округлением к большему целому числу для $\beta = 0,9; 0,99; 0,999$ и $p_{\max} = 10^{-2}; 10^{-4}; 10^{-6}$ сведена в табл. 1.

Как следует из данных этой таблицы, целесообразно проводить число экспериментов для выбора ΔL_{\max} при $p_{\max} = 10^{-2}$ при $\beta = 0,9; 0,99; 0,999$ и обосновывать условия безопасности путём выбора алгоритма, использующего значение ΔL_{\max} при $p_{\max} = 10^{-2}$.

Пусть в некоторой точке пути два раза проведено измерение расстояния до препятствия: первый раз – результат измерения L_1 , второй раз – результат измерения L_2 . В каждом из этих результатов вероятность того, что погрешность измерения превышает ΔL_{\max} составляет $p_{\max} = 10^{-2}$ при фиксированном доверительном интервале. Тогда вероятность того, что в обоих случаях погрешность превышает ΔL_{\max} составляет $p_{\max} = 10^{-4}$. Если из L_1 и L_2 выбрать наименьшее и это значение использовать для принятия решения о торможении, можно обосновать выбор ΔL_{\max} уже с вероятностью её превышения 10^{-4} . Аналогично при использовании трёх измерений $p_{\max}^3 = 10^{-6}$. Для обеспечения требований SIL-4, число измерений равно 4. Таким образом, используя при принятии решения нескольких измерений, распределённых во времени, уменьшается вероятность опасной ситуации. Очевидно, что, зная длительность одного измерения и скорость движущегося объекта, величина ΔL_{\max} увеличивается на длину пути, пройденного этим объектом за время k измерений.

Рассмотрим пример. Пусть известно, что в результате 459 испытаний максимальная величина погрешности не превысила 20% измеряемого расстояния. Максимальное измеряемое расстояние равно 2 км. Тогда $\Delta L_{\max} = 400$ м и вероятность того, что погрешность будет превышать эту величину в соответствии с данными табл. 1 при доверительном интервале 0,99 составляет $p_{\max} = 10^{-2}$. Если выбрать из результатов трёх измерений наименьший, то вероятность того, что $\Delta L_{\max} > 400$ м составляет 10^{-6} . Очевидно, что в данном примере максимальное измеряемое расстояние превышает длину тормозного пути поезда, движущегося с максимально допустимой скоростью.

Дополнительным способом, уменьшающим вероятность столкновения, является использование второго канала измерений. В этом случае выбирается минимальное измеренное расстояние до объекта при многократном измерении в каждом из каналов. Пусть, например, в каждом из двух каналов используются результаты двух измерений при $p_{\max} = 10^{-2}$. Тогда обеспечивается выбор ΔL_{\max} с вероятностью того, что реальная погрешность превысит ΔL_{\max} , составляет 10^{-8} .

Следует отметить, что наличие второго канала технического зрения, аппаратура которого расположена вне поезда, необходима также потому, что бортовые устройства не видят препятствия при наличии кривых. В этом случае, допустимую вероятность опасной ситуации следует обеспечивать путём описанного выше алгоритма при k измерениях по второму каналу.

Оценки величины максимальной погрешности расчёта тормозного пути поезда

Аналізу точности прицельного торможения посвящено значительное число экспериментальных и теоретических исследований. Теоретические исследования, как правило, использовали математическое моделирование, в частности, методы имитационного моделирования. В этих исследованиях [14–17] поезд





задавался своими, хорошо известными математическими моделями, используемыми в тяговых расчётах, при анализе процесса торможения в длинносоставных тяжеловесных поездах с распределённой тягой. Моделировались различные законы управления, реализуемые в обратной связи систем прицельного торможения, относящихся к классу терминальных систем [14–16; 18]. Системами прицельного торможения обеспечивали остановку поезда с заданной точностью в определённой точке пути. Особенно высокие требования к таким системам предъявляются в условиях метрополитена, когда требуется остановить поезд перед фиксированной точкой с погрешностью, не превышающей 20 см. При этом требуется обеспечить минимальное время торможения, так как увеличение этого времени на 1 сек. при заданном времени хода по перегону увеличивает расход энергии на тягу примерно на 1 %. На магистральных железных дорогах аналогичная погрешность может составлять 5 м. В системах безопасности движения, в которых решается задача «не допустить столкновения с препятствиями», требуется, прежде всего, при обнаружении последнего обеспечить остановку поезда до этого препятствия, возможно даже на разумно допустимом расстоянии.

Системы прицельного торможения должны обеспечить заданную точность остановки на многообразии видов профиля перед точкой остановки.

В ряде ситуаций возникает необходимость включения системы экстренного торможения. В этом случае используется максимально допустимая сила торможения, система управления становится разомкнутой. Основное требование – обеспечение минимальной длины тормозного пути.

Для учёта влияния возмущений на величину погрешности реализации заданного тормозного пути использовались методы имитационного моделирования, в частности, метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). При этом моделируются случайная величина погрешности измеряемой скорости, используемой в обратной связи системы сравнения прицельным торможением, случайные отклонения дополнительного сопротивления движения от расчётного. Следует отметить, что дополнительное сопротивление движению, как правило, много меньше силы торможения, и его вариации оказывают нежелательное влияние на погрешность прицельной остановки. При статистиче-

ском моделировании выбирают различные наборы элементов профиля и плана пути. В рассматриваемой в данной статье задаче возможен набор «наихудшего» с точки зрения условий безопасности профиля. Это позволяет уменьшить объём статистических испытаний.

При выборе стохастических моделей случайных величин всегда стоит вопрос об обосновании не только их функций распределения плотности вероятности, но и об обосновании диапазона изменений этих величин. В частности, диапазон изменения погрешности изменения скорости может выбираться из технических характеристик тракта измерения, определённых изготовителем в условиях использования приборов в работоспособном состоянии. Одновременно необходимо оговаривать меры, принятые к возможному привлечению аномальных погрешностей, и совокупность мер по их парированию. Например, наличие нескольких каналов измерений и способы диагностики этих каналов, наличие противоюзных и противобуксовых систем, способы коррекции измеряемого пути, пройденного поездом и т.д. Следует отметить, что имеющийся опыт эксплуатации автоматических систем прицельного торможения, многолетний опыт сравнения реальных параметров движения поездов с результатами тяговых расчётов, свидетельствуют об адекватности моделей, описывающих движение поезда, реально исследуемым объектам. Наличие инструкций и правил производства тяговых расчётов, верификация программного обеспечения этих расчётов позволяют считать эти модели цифровыми двойниками поездов.

Будем считать нормальным значением результата расчёта тормозного пути величину, полученную в предположении, что все параметры математической модели определены точно. Погрешностью расчёта тормозного пути будем называть разность между номинальным значением и величиной тормозного пути, рассчитанную при отклонении параметров модели от заданных. Приведём результаты анализа влияния погрешностей измерения в тракте измерения скорости на величину погрешности расчёта тормозного пути [15]. В имитационных экспериментах принято, что максимальная погрешность измерения скорости поезда не превышает десятой части от текущего значения скорости, функция распределения плотности вероятности случайной величины – закон равномерной плотности

вероятности с нулевым математическим ожиданием. Тогда:

$$\Delta V = 0,1V(\text{rnd}(2)-1), \quad (9)$$

где V – скорость движения поезда;

ΔV – погрешность измерения скорости;
 $\text{rnd}(2)$ – функция генерации равномерно распределённых чисел в диапазоне от 0 до 2.

Результаты имитационных экспериментов получены для моделей пригородных поездов, оборудованных системами управления торможением с различными законами управления [15; 16].

Для каждой из этих моделей по результатам не менее 200 имитационных экспериментов построены гистограммы относительных частот погрешностей (рис. 1 и рис. 2), предложены законы распределения плотности вероятности погрешностей расчёта тормозного пути, в соответствии с критерием χ^2 Пирсона показано, что выбранные законы распределения плотности вероятности не противоречат результатам эксперимента.

Полученная статистика описывается распределением Пирсона I типа. При построении системы управления торможением по ускорению [16] наблюдаемый в экспериментах диапазон измерения погрешностей расчёта тормозного пути составил $-3 \text{ м} \leq \Delta S_{\text{торм}} \leq 1,5 \text{ м}$, при построении системы управления торможением по скорости [15] $-2 \text{ м} \leq \Delta S_{\text{торм}} \leq 3,5 \text{ м}$. Число проведённых имитационных экспериментов, достаточное для определения закона распределения плотности вероятности случайной величины погрешности расчёта тормозного пути, не позволяет с необходимой вероятностью, требуемой международными нормами, утверждать, что случайная величина находится в данном диапазоне. Поэтому дополнительно необходимо увеличить число имитационных экспериментов в соответствии с данными табл. 1. Например, до 229, чтобы с вероятностью 10^{-2} и доверительным интервалом 0,9 утверждать, что максимальная по модулю величина отрицательного значения погрешности расчёта тормозного пути не превысит 3 м (рис. 1) при использовании систем управления торможением по скорости. Для того же утверждения с вероятностью 10^{-4} и доверительным интервалом 0,9 необходимо (см. табл. 1), чтобы было проведено 46050 имитационных экспериментов.

С целью сокращения числа экспериментов возможен другой подход, также использующий современные средства вычислительной

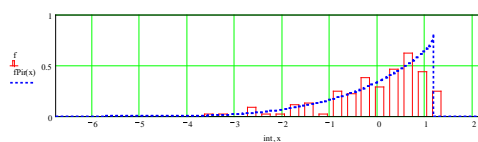


Рис. 1.

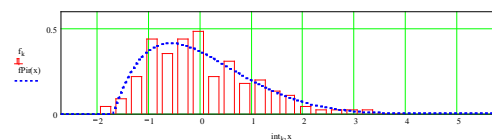


Рис. 2.

техники. При известной математической модели объекта требуется решить оптимизационную задачу минимизации модуля отрицательной величины погрешности расчёта тормозного пути при заданных областях определения переменных, влияющих на результаты расчёта. Этот подход из-за ограниченного объёма не рассматривается в рамках данной статьи.

Совокупность результатов, позволяющих с заданной вероятностью определить предельные значения величин погрешности измерения расстояния до препятствия и прогноза пути торможения, даёт возможность формировать алгоритмы функционирования системы обеспечения безопасности и обосновывать её соответствие международным требованиям.

ВЫВОДЫ

1. При построении беспилотных систем управления движением необходимо обеспечить остановку поезда перед препятствием, появившимся на пути. Эта функция должна быть реализована с вероятностью, близкой к единице. В соответствии с международными нормами допустима вероятность опасной ситуации составляет 10^{-8} для SIL-4. В качестве датчика препятствия используются системы технического зрения. Для выполнения требуемых условий безопасности необходимо использовать алгоритм многократных измерений расстояния до препятствия с выбором минимального результата измерений для принятия решения о начале торможения.

2. Учитывая наличие кривых в пути следования, что приводит к невозможности индикации препятствия бортовой системой технического зрения, необходимо наличие второго ка-



нала технического зрения с аппаратурой, располагаемой вне локомотива. В данном канале также необходимо использовать многократные измерения расстояния до места препятствия.

3. Выбор числа измерений в каждом канале с целью обоснования безусловного выполнения показателя безопасности не осуществляется по методике, рассмотренной в данной работе.

4. Длина защитного промежутка перед препятствием равна сумме максимальной по модулю величины отрицательной погрешности расчёта тормозного пути и максимального значения положительной величины погрешности измерения расстояния до препятствия. Выбор этих величин определяется требованиями безусловного выполнения норм безопасности.

5. Рассматриваемые способы выбора максимальных значений случайных погрешностей измерений и расчётов, величины которых могут быть превышены с весьма малыми вероятностями, соответствующими «хвостам» функций плотности распределения вероятности, могут быть использованы в решении различных прикладных задач управления движением на транспорте.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Matthies, Larry. Obstacle Detection, 2014. In: Ikeuchi K. (ed). Computer Vision. Springer, Boston, MA. DOI: 10.1007/978-0-387-31439-6_52.
2. Jain, R., Tamgadge, P., Swaroopa, R., Bhure, P., Shahu, S., Pote, R. Simulation of Obstacle Detection of an Autonomous Car. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology, 2021, pp. 430–435. DOI: 10.48175/IJARSCT-1420.
3. Asuka, Masashi; Kataoka, Kenji; Komaya, Kiyotoshi; Nishida, Syogo. Automatic Train Operation Using Autonomic Prediction of Train Runs. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, Vol. 128, pp. 1365–1372. DOI: 10.1541/ieejias.128.1365.
4. Chen Zhang; Xuewu Xu; Chen Fan; Guoping Wang. Literature Review of Machine Vision in Application Field. E3S Web of Conferences, 2021, Vol. 236, pp. 04027. DOI: 202123604027.
5. Zhongfei Zhang, Weiss, R., Hanson, A. R. Obstacle detection based on qualitative and quantitative 3D reconstruction. IEEE Transactions on Pattern Analysis and

Machine Intelligence, 1997, Vol. 19, pp. 15–26. DOI: 10.1109/34.566807.

6. Feiden, D., Tetzlaff, R. Cellular neural networks for motion estimation and obstacle detection. Adv. Radio Sci., 2003, Vol. 1, pp. 143–147. DOI: <https://doi.org/10.5194/ars-1-143-2003>.

7. Lourenço, A., Marques, F., Santana, P., Barata, J. A volumetric representation for obstacle detection in vegetated terrain, 2014. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014), 2014, pp. 283–290, DOI: 10.1109/ROBIO.2014.7090344.

8. Bernini, N., Bertozzi, M., Castangia, L., Patander, M., Sabbatelli, M. Real-time obstacle detection using stereo vision for autonomous ground vehicles: A survey. 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014, pp. 873–878. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6957799.

9. Takahashi, Katsuhiko. Obstacle detection device and method and obstacle detection system, 2014. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/302747500_Obstacle_detection_device_and_method_and_obstacle_detection_system. Доступ 16.11.2021.

10. Khan, Umair; Fasih, Alireza; Kyamakya, Kyandoghene; Chedjou, J. Genetic Algorithm Based Template Optimization for a Vision System: Obstacle Detection, 2009. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/228347428_Genetic_Algorithm_Based_Template_Optimization_for_a_Vision_System_Obstacle_Detection/. Доступ 16.11.2021.

11. Охотников А. Л., Чернин М. А. Разработка систем для автономного подвижного состава // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 11. – С. 21–24. DOI: 10.34649/AT.2021.11.11.006.

12. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учебник. – 12-е изд., стер. – М.: Юстиция, 2018. – 658 с. ISBN 978-5-4365-1927-2.

13. Баранов Л. А. Оценка интервала попутного следования поездов для систем безопасности движения на базе радиоканала // Мир транспорта. – 2015. – № 2. – С. 6–24. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/260>. Доступ 16.11.2021.

14. Баранов Л. А., Головичер Я. М., Ерофеев Е. В., Максимов В. М. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Под ред. Л. А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с. ISBN 5-277-00964-7.

15. Бестемьянов П. Ф. Методы повышения безопасности микропроцессорных систем интервального регулирования движения поездов // Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М.: Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ), 2001. – 48 с.

16. Никифоров Б. Д., Головин В. И., Кутыев Ю. Г. Автоматизация управления движением поездов. – М.: Транспорт, 1985. – 263 с.

17. Pudovikov, O. E., Kiselev, M. D. Optimization of Parameters of Automatic Speed Control System of a Freight Train with Distributed Traction. Russian Electrical Engineering, 2020, Vol. 91, No. 9, pp. 568–576. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45136886>. Доступ 16.11.2021.

18. Батенко А. П. Управление конечным состоянием движущихся объектов. – М.: Сов. Радио, 1977. – 256 с. ●

Информация об авторах:

Баранов Леонид Аврамович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления и защиты информации Российского университета транспорта, Москва, Россия, Baranov.mii@gmail.com.

Бестемьянов Пётр Филимонович – доктор технических наук, профессор, директор Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта, Москва, Россия, ilemsmiit@yandex.ru.

Балакина Екатерина Петровна – кандидат технических наук, доцент Российского университета транспорта, Москва, Россия, balakina_e@list.ru.

Охотников Андрей Леонидович – заместитель начальника Департамента – начальник Отдела стратегического развития Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия, a.ohotnikov@vniia.ru.

Статья поступила в редакцию 16.11.2021, одобрена после рецензирования 23.12.2021, принята к публикации 27.12.2021.