

ТРАНСПОРТНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 629.4.06, 629.05, 656.052.16

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПОЕЗДОМ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ И ВАРИАНТЫ ИХ РАСЧЕТОВ

Охотников А.Л., заместитель технического директора АО «РДС»,
начальник отдела АО «НИИАС», Москва, Россия,
E-mail: ohotspb@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены измеряемые параметры и условия, которые влияют на валидность измерений системы управления подвижным составом, в которую входят средства технического зрения и высокоточного позиционирования. Эти высокотехнологичные технические средства заменяют когнитивные способности машиниста и служат для решения задач повышения уровня безопасности движения поездов, в частности, беспилотного подвижного состава. Рассмотрены параметры, влияющие на движение автономного транспортного объекта и его управление в различных информационных ситуациях, с учетом условий применения на железнодорожном транспорте. Выделены внутренние и внешние параметры. Предложено использовать метеорологическую оптическую видимость (MOR) для различных сценариев применения системы технического зрения. В зависимости от оптической видимости предложен расчет дальности обнаружения объектов-препятствий на железнодорожных путях. Для выполнения поставленной цели по определению местоположения подвижного объекта, перемещающегося по заданному участку пути, разработан метод, основанный на данных картографии, послуживший основой для изобретения.

Ключевые слова: информационная ситуация, система технического зрения, метеорологическая оптическая видимость, прозрачность воздуха, высокоточная система позиционирования, ортодромия.

SELECTION OF PARAMETERS FOR AUTOMATIC TRAIN CONTROL AND THEIR CALCULATION OPTIONS

Okhotnikov A. L., Deputy Technical Director of JSC «RDS»,
Head of Department, JSC «NIAS», Moscow, Russia,
E-mail: a.ohotspb@mail.ru

ABSTRACT

Abstract: The article considers the measured parameters and conditions that affect the validity of measurements of the rolling stock control system, which includes vision and high-precision positioning tools. These high-tech technical means replace the cognitive abilities of the driver and serve to solve the problems of improving the level of safety of train traffic, in particular, unmanned rolling stock. The parameters affecting the movement of an autonomous transportation object and its control in various information situations are considered, taking into account the conditions of application in railway transportation. Internal and external parameters are singled out. Meteorological optical visibility (MOR) for different scenarios of vision system application is proposed. Depending on the optical visibility, the calculation of the detection range of obstacle objects on railroad tracks is proposed. To solve the problem of determining the current coordinates of a transportation object moving along a known trajectory on the basis of cartographic information, a method is proposed, which formed the basis of the invention.

Keywords: information situation, vision system, meteorological optical visibility, air transparency, high-precision positioning system, orthodromy.

Введение

Для решения задач управления транспортным объектом при автоматическом движении важно точное определение параметров, характеризующих его движение и влияющих на принятие эффективного управленческого решения.

Устройство автоведения поезда использует эти параметры для расчёта модели движения поезда и выбора оптимальных режимов для его управления, с учетом обеспечения безопасности, выполнения расписания, минимизации расходов на электроэнергию. Другими словами, система управления выполняет энергетически рациональное автоматизированное управление тягой и всеми видами тормозов, обеспечивает точное соблюдение времени хода на участке, которое отвечает текущему графику движения поездов (ГДП) и действующим нормативным документам.

В управлении движением поезда, особенно в режиме беспилотного ведения, для обеспечения безопасности движения большую роль играют современные средства технического зрения и высокоточного позиционирования. С помощью этих технических систем, заменяющих когнитивные способности человека, поезд может двигаться продолжительное время с требуемым уровнем безопасности в любую погоду.

Для корректной работы этих технических систем необходимо рассмотреть измеряемые ими параметры и внешние условия, которые влияют на валидность измерений системы управления подвижным составом, осуществляющей изменение режима движения, в частности, без машиниста.

1. Решение задачи

Примем за параметры, влияющие на движение транспортного объекта (ТО) и его управление в различных информационных ситуациях, с учетом условий применения на железнодорожном транспорте, внутренние: скорость поезда, координаты ТО, масса поезда, вид тормозной системы вагонов и подвижного состава (ПС); внешние: координаты и расстояние до препятствий, крутизна уклона (подъема, спуска), кривизна пути, сцепление системы «колесо-рельс» (коэффициент скольжения), освещенность (солнечная погода, рассвет, закат, сумерки, темное время суток), видимость (ясный прозрачный воздух, слабая видимость), прозрачность (туман, смог, мгла, облачно).

Рассмотрим влияние погодных условий на работу системы технического зрения (СТЗ). По примеру авиации, в целях эффективной работы СТЗ важное значение имеет такой параметр как метеорологическая оптическая видимость (*MOR - Meteorological Optical Range*) [1]. **Данная характеристика применяется при управлении полетами для определения дальности видимости взлетно-посадочной полосы (ВВП).** В методике [2] дано определение дальности видимости для ВПП при использовании средств измерения. Также определены такие важные термины как «визуальный порог освещенности», «видимость», «метеорологическая дальность видимости», «дальность видимости», «порог контрастной чувствительности» и другие. **Использование таких параметров на железнодорожном транспорте безусловно положительно отразится на качестве определения объектов-препятствий и в целом качестве работы СТЗ.**

Для применения СТЗ в условиях железнодорожной отрасли определены сценарии управления поездом в зависимости от погодных условий и оптической видимости воздуха. Выделим 6 классов видимости [3].



Таблица 1.

Дальность определения объектов исходя из условий оптической видимости

№	Видимость	Расстояние, м
1	Очень плохая	0-500
2	Плохая	500-2000
3	Средняя	2000-10000
4	Хорошая	10000-20000
5	Очень хорошая	20000-35000
6	Исключительная	35000-50000

Условия освещенности также влияют на вероятность обнаружения препятствий. Параметры освещенности приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Параметры освещенности

№	Условия освещенности	Освещенность, лк
1	Дневное, естественное освещение на улице в солнечную погоду	5000 - 100000
2	Дневное, естественное освещение на улице в облачную погоду	1500 - 5000
3	Закрытая территория, тень от сооружений	750 - 1500
4	Туннели/путепроводы	100 – 500
5	Сумеречное освещение	100 - 200
6	Ночью в полнолуние	0,2

В соответствии с ГОСТ 54984-2012 «Освещение наружное объектов железнодорожного транспорта» минимальные нормы освещенности составляют от 1 до 50 лк в зависимости от назначения объектов железнодорожного транспорта.

Таблица 3.

Прозрачность воздуха при различных погодных условиях

№	Состояние атмосферы	Коэффициент прозрачности	Дальность видимости, км
1	Воздух абсолютно чист	0,99	300
2	Исключительно высокая прозрачность	0,97	150
3	Воздух очень прозрачен	0,96	100
4	Хорошая прозрачность	0,92	50
5	Средняя прозрачность	0,81	20
6	Воздух несколько мутен	0,66	10
7	Воздух мутен (мгла)	0,36	4
8	Воздух очень мутен (сильная мгла)	0,12	2
9	Легкий туман	0,015	1
10	Туман	$2 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-10}$	0,2-0,5
11	Густой туман	$10^{-19} - 10^{-34}$	0,05-0,1

Источник: В.В. Шаронов «Наблюдение и видимость» [4]



Коэффициент прозрачности $K_{пр}$ рассчитывается из отношения $Q_{св}$ количества света, пропущенное слоем воздуха в 1 км толщины, к $S_{вх}$ количеству света, прошедшему через этот слой:

$$K_{пр} = Q_{св} / S_{вх}$$

Существует множество разных специальных измерительных устройств с целью расчета прозрачности воздуха. Один из вариантов построен на базе прожектора, луч света которого направлен вдоль земли. На пересечении луча света расположены два наблюдателя (измерителя) на расстоянии до 1 км. Каждый наблюдатель имеет специальный прибор - фотометр, с помощью которого можно измерить такой параметр как интенсивность света. При сравнении измерений каждого наблюдателя (измерителя) определяется величина затухания светового потока в каждом месте измерения.

В случае известного коэффициента прозрачности, определенного для расстояния в 1 км, рассчитывается доля света, проходящего через каждый слой воздуха для 2, 3, 4 и т. д. километров. В этом случае, степень коэффициента прозрачности воздуха принимается равным числу километров. Приведем пример для коэффициента прозрачности воздуха равным 0,8. Тогда через слой воздуха в 3 км пройдет доля света:

$$0,8 \times 0,8 \times 0,8 = 0,512.$$

Для слоя воздуха в 4 км остается доля света:

$$0,8 \times 0,8 \times 0,8 \times 0,8 = 0,41$$

Дальность видимости – это максимальное расстояние, на котором СТЗ перестает обнаруживать препятствие (объект). Данный параметр обычно еще поменяют понятием «дальность открытия». Это максимальное расстояние, на котором препятствие (объект) становится видимым для СТЗ на горизонте наблюдения. Тогда введем еще один параметр «метеорологическая дальность видимости» - это максимальное расстояние до абсолютно черного предмета больших размеров на фоне неба у горизонта.

Известно, что абсолютно черных объектов в природе не существует, поэтому реальные объекты имеют способность отражать часть световых лучей. Принимая это понимаем, что метеорологическая дальность видимости является условной, теоретической характеристикой видимости. Между тем существует достаточно много темных объектов, которые очень слабо отражают световые потоки – это деревья, листва в лесу, склоны холмов из чернозема, темные искусственные сооружения, люди в темной одежде и т.д. Такие объекты хуже видно и для них реальная дальность видимости будет отличаться от расчетной метеорологической видимости.

Обратную ситуацию дают светлые объекты, которые отражают много света. В плохую пасмурную погоду, без прямых солнечных лучей светлые объекты могут быть светлее, чем небосклон, и их дальность видимости будет больше метеорологической. Серые объекты меньше отличаются от горизонта, поэтому такие объекты быстрее скроются в тумане на меньшем расстоянии. Самые слабо обнаруживаемые объекты – светло-серые или белые (снежные холмы, горы). В условиях тумана они сливаются с общим фоном и их невозможно разглядеть. Для удобства расчета дальности видимости объектов в различных условиях применяются подробные таблицы, которые составлены с учетом наблюдений, например, от профессора Н. Г. Болдырева (номограмма) [5] и В. Б. Вейнберга [6].

Оценку видимости для СТЗ предлагается производить в баллах. Для этого достаточно использовать 9 объектов, которые расположены на расстояниях в: 50 м, 200 м, 500 м, 1 км, 2 км, 4 км, 10 км, 20 км и 50 км. Тогда для целей оперативной работы и настройки СТЗ можно составить таблицу.



Таблица 4.

Прозрачность воздуха в баллах

№	Предмет (объект) виден, м	Предмет (объект) не виден, м	Балл
1	–	50	0
2	50	200	1
3	200	500	2
4	500	1 000	3
5	1 000	2 000	4
6	2 000	4 000	5
7	4 000	10 000	6
8	10 000	20 000	7
9	20 000	50 000	8
10	50 000 и более	–	9

Для расчета метеорологической оптической видимости (MOR) принято использовать закон Кошмидера, вытекающем из закона Бугера-Ламберта. Чтобы рассчитать MOR необходимо найти отношение видимого яркостного контраста C_x наблюдаемого объекта, к его собственному яркостному контрасту C_0 , который имеет объект наблюдения на фоне горизонта с достаточно близкого расстояния.

$$MOR = C_x / C_0$$

Метеорологическая видимость (оптическая дистанция) MOR может быть определена как расстояние в атмосфере, при котором интенсивность света от источника с температурой 2700 К снижается до 5% его первоначальной интенсивности. Оценка интенсивности света производится через применение функции яркостной чувствительности, установленной международной организацией по освещению (измеряется в м или км).

Минимальный уровень светового восприятия (визуальный порог освещенности) определяется как самая низкая степень освещения, позволяющая различать мельчайший световой объект на допустимой дистанции (измеряется в люксах, лк).

Для разных объектов при различных погодных условиях подготовлен расчет дальности обнаружения объектов-препятствий.

Таблица 5.

Требования к функционированию СТЗ

№	Функция	Ясная погода	Пасмурно	Опасные условия	Вероятность ложного срабатывания
		Дальность (м) (вероятность (%)) обнаружения			
1	Обнаружение мелких животных	120 (95)	60 (95)	15 (95)	10^{-4}
2	Обнаружение тупиковой призмы	240 (95)	120 (95)	25 (95)	10^{-4}
3	Обнаружение человека	240 (95)	120 (95)	25 (95)	10^{-4}
4	Обнаружение крупных животных	360 (95)	180 (95)	35 (95)	10^{-4}
5	Обнаружение автомобильного транспорта	450 (95)	225 (95)	45 (95)	10^{-4}
6	Обнаружение железнодорожного транспорта	600 (95)	300 (95)	60 (95)	10^{-4}
7	Обнаружение объектов с размерами (расстояние/250м) ²	1000 (95)	500 (95)	100 (95)	10^{-4}

Источник: По данным от DB NETZ.

Учет этих параметров необходим для ограничения скорости поезда на таких участках, где видимость ухудшается и дальность определения препятствия резко снижается, что важно для обеспечения безопасности движения поезда при расчете кривой торможения. Такая зависимость вызывает необходимость введения в алгоритмы расчета модели движения поезда поправочных коэффициентов и учета корректировки при калибровке и настройке вычислителей и устройств СТЗ. Причем система калибровки должна работать адаптивно исходя из текущей информационной ситуации и параметров внешней среды. Создание и анализ адаптивной системы на борту ПС для учета всех указанных параметров в СТЗ выходит за рамки исследования.

Из широкого перечня необходимых параметров для управления ТО и расчета управляющего воздействия основными являются скорость и координаты позиционирования ТО. В свою очередь информационная транспортная ситуация включает единую координатную среду и единую навигационную среду [7].

2. Способ определения координат ТО

Для решения задачи высокоточного позиционирования различных ТО, движущихся по известным траекториям (рельсовым путям), с отражением пути следования на электронной карте в результате исследования предлагается следующий способ, который лег в основу изобретения «Устройство позиционирования транспортных средств» (RU 2689840 С1 от 10.10.2018) [8].

Известные устройства позиционирования ТО в основном базируются на приеме спутниковых навигационных сигналов [9], астронавигационных измерений [10] и др. Недостатками таких устройств являются как использование сложной и дорогостоящей навигационной аппаратуры, так и требование наличия постоянной связи с искусственными спутниками Земли (на практике не всегда возможное, особенно в современной обстановке), что накладывает очевидные ограничения при их применении.

Результат достигается за счет того, что перед началом движения транспортного объекта программная траектория разбивается на короткие прямолинейные отрезки, которые аппроксимируют эту траекторию на ортодромы. Существует прямая зависимость между указанными участками и их географическими параметрами. В процессе перемещения объекта вдоль заданного кратчайшего пути траекторий, используя данные о проекции скорости относительно собственной системы отсчета от трех ортогональных датчиков, бортовой компьютер объекта определяет величину модуля скорости. Значение интеграла проходит через трансформацию, включающую нелинейные тригонометрические операции, где его аргумент масштабируется и сдвигается на фиксированную константу; затем результат масштабируется и возвращается обратно через инверсную тригонометрическую операцию. После указанных преобразований получим значение широты ТО. Используя функциональную зависимость географических координат на ортодромических отрезках, можно рассчитать долготу управляемого объекта [11].

При вычислении текущего местоположения транспортного объекта, перемещающегося по заранее известному участку, траектория, используя геоданные цифровой модели пути, подвергается сегментации перед началом перемещения на отрезки, которые можно приближенно представить минимальными прямолинейными участками между контрольными точками (называемыми ортодромами) с требуемой степенью точности.



Для ортодромии используем зависимость между долготой λ и широтой φ объекта управления:

$$\lambda = \arcsin\left(\frac{tg\phi \sin(\lambda_1 - \lambda_0)}{\sqrt{tg^2\phi_0 + tg^2\phi_1 - 2tg\phi_0tg\phi_1\cos(\lambda_1 - \lambda_0)}}\right) - \arctg\frac{tg\phi_0 \sin\lambda_1 - tg\phi_1 \sin\lambda_0}{tg\phi_1 \cos\lambda_0 - tg\phi_0 \cos\lambda_1} = \arcsin(P \cdot tg\phi) - P_0, \quad (1.1)$$

где $(\lambda_0, \phi_0), (\lambda_1, \phi_1)$ - координаты начальной и конечной точки ортодромического отрезка.

Тогда модуль скорости ТО $|V|$ представим в виде [12]:

$$|V| = V_Y \frac{\cos\phi}{\sqrt{\frac{1}{1+P^2} - \sin^2\phi}} \quad (1.2)$$

где V_Y - проекция скорости подвижного объекта на ось OY географической системы координат (ГСК).

Из (1.2) возможно трансформировать известное навигационное уравнение измерения широты объекта:

$$\dot{\phi} = \frac{V_Y}{r+h} \quad (1.3)$$

где h - высота объекта над поверхностью Земли, а r - радиус Земли, к следующему виду:

$$\dot{\phi} = \frac{|V|}{\left\{ \frac{\cos\phi}{\sqrt{\frac{1}{1+P^2} - \sin^2\phi}} \cdot (r+h) \right\}} \quad (1.4)$$

Из (1.4) интегрируем разделение переменных:

$$(r+h) \cdot \int_{\phi_0}^{\phi} \frac{\cos\phi}{\sqrt{\frac{1}{1+P^2} - \sin^2\phi}} \cdot d\phi = \int_{t_0}^t |V| dt \quad (1.5)$$

Можно использовать значение интеграла как указано в [13]:

$$\int_{\phi_0}^{\phi} \frac{\cos\phi}{\sqrt{\frac{1}{1+P^2} - \sin^2\phi}} d\phi = \arcsin\left\{ (1+P^2)^{\frac{1}{2}} \sin\phi \right\} - \arcsin\left\{ (1+P^2)^{\frac{1}{2}} \sin\phi_0 \right\},$$

имеем зависимость широты ТО от модуля его скорости ($|V|$):

$$\phi = \arcsin\left\{ (1+P^2)^{-\frac{1}{2}} \sin\left[\frac{\int_{t_0}^t |V| dt}{(r+h)} + \arcsin\left\{ (1+P^2)^{\frac{1}{2}} \sin\phi_0 \right\} \right] \right\} \quad (1.6)$$

Определение величины модуля скорости перемещения транспортного объекта можно измерить тремя перпендикулярно расположенными датчиками различных типов (например, лазерными [14], радиометрическими [15] или оптических [16]), закрепленными неподвижно к его корпусу. Так как скорость объекта остается неизменной независимо от выбранной системы отсчета, угловое вращение ТО не оказывает влияния на способ его определения, позволяя исключить использование датчиков угловой скорости и упростить структуру измерительной системы относительно стандартной модели. >>>

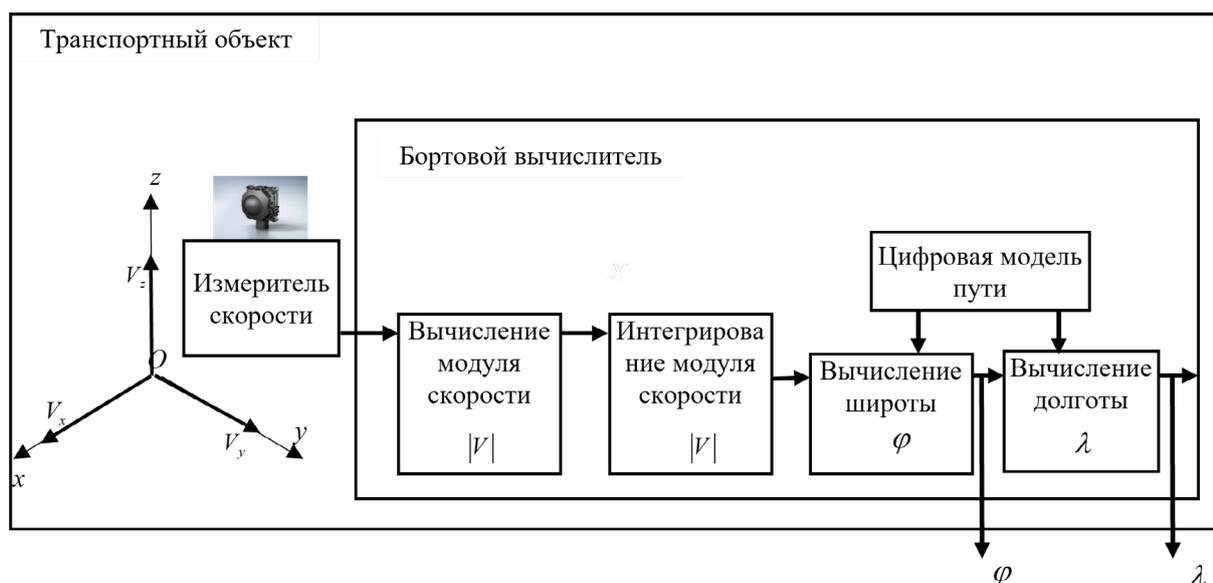


Рис 1. – Способ измерения координат ТО

Для реализации указанного способа позиционирования подвижного объекта на ортодромическом отрезке ЦМП необходимо:

- измерить проекций скорости в системе координат, связанной с объектом управления (три ортогональными измерителями);
- вычислить модуль скорости ТО в вычислителе ТО;
- вычислить интеграл от модуля скорости в текущем времени;
- вычислить текущее значение широты с использованием соотношения (1.6);
- вычислить значение долготы λ с использованием соотношения (1.1).

Предложенная методика определения координат подвижного объекта позволяет минимизировать потребность в измерительной аппаратуре (путем исключения приборов измеряющих угловое вращение объекта) и сокращает объем вычислений навигационной информации (исключая процесс решения дифференциальных уравнений движения и угловой ориентации), а также повышает надежность и точность позиционирования объекта при отсутствии сигналов спутниковых измерений или в условиях сильных шумов (в т.ч. спуфинга), позволяет произвести корректный расчет кривой торможения до обнаруженного препятствия.

Выводы

Для использования СТЗ как системы, отвечающей за безопасность движения ТО, необходимо ее тестирование в условиях полигона с применением различных сценариев для разных видов маневров при любой погодной обстановке. Для массового применения средств технического зрения необходимо подтвердить её способность точно выявлять все существующие типы объектов-препятствий и сигналов в разнообразных погодных и световых условиях, а также на разных элементах инфраструктуры, включая перегоны, станции и кривые участки пути. В [17] определено минимальное количество испытаний с заданным доверительным интервалом, которые требуются для соблюдения условий уровня полноты безопасности (УПБ) согласно УПБ2 и УПБ4.

Установлено, что при анализе отдельных элементов сложной технической системы, при соответствии стандарту, скажем, УПБ2, это не гарантирует полную безопасность всей системы уровню УПБ2. Поскольку вероятность сбоя всей системы превышает вероятность неисправности её элементов. За счет дублирования таких элементов возможно создать более устойчивую систему.

В качестве резервирования на борту поезда рекомендуется использовать пары одного типа оборудования, например, видекамеры, лидары, тепловизоры. Использование >>>

инфраструктурных СТЗ (стационарных и мобильных) также можно считать элементами резервирования интегрированной СТЗ.

Помимо известных вариантов определения внутренних параметров ТО в статье предложен алгоритм расчета координат ТО. Причем координаты рассчитываются для движущегося объекта на ортодромических отрезках пути с использованием ЦМП, через известную зависимость долготы λ от широты φ объекта, а также проекции скорости ТО на ось OY географической системы координат. Скорость ТО можно рассчитать за счет введения в устройство трех катушек индуктивности или оптических излучателей и приемника, которые располагаются над рельсовой колеёй на одинаковом расстоянии от нее [18].

Предложенные варианты определения параметров ТО позволяют повысить качество и точность определения скорости и координат и снизить вычислительные и аппаратные затраты на борту локомотива (электропоезда).

Список использованной литературы

1. РД 52.21.680-2006 Руководство по определению дальности видимости ВПП (RVR) (с Поправкой № 1), РД от 30 июня 2006 года № 52.21.680-2006.
2. ПНСТ Автомобильные транспортные средства. Системы оптического распознавания объектов. Общие технические требования и методы испытаний.
3. Охотников, А. Л. Синтез систем технического зрения локомотива на основе сценарного подхода / А. Л. Охотников, Л. А. Баранов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 53-61. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_53.
4. Шаронов, В.В. Наблюдение и видимость // URL: \ http://vrazvedka.ru/main/learning/vopros-ob/sharonov_03.html (Дата обращения 10.01.2021).
5. Болдырев, Н.Г. Руководство по определению дальности видимости реальных объектов в светлое время суток [Текст] / Н. Г. Болдырев и О. Д. Бартенева; Под ред. П. В. Стороженко; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете министров СССР. Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова. - Ленинград: изд-во и 2-я типолитограф. Гидрометеоиздата, 1950. – 22 с.
6. Вейнберг, В.Б. Оптика световодов [Текст] / В.Б. Вейнберг, Д.К. Саттаров. - 2-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1977. - 319 с.
7. Дзюба, Ю. В. Мобильное управление подвижными объектами / Ю. В. Дзюба, А. Л. Охотников // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – Т. 2, № 1(5). – С. 16-25.
8. Патент № 2689840 С1 Российская Федерация, МПК G01C 21/26. Устройство позиционирования транспортных средств: № 2018135641: заявл. 10.10.2018: опубл. 29.05.2019 / Ю. В. Дзюба, А. Л. Охотников, И. Н. Розенберг [и др.]; заявитель АО «НИИАС».
9. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М: Радиотехника, 2010. 800 с.
10. Сайт Штурман URL: / http://shturman-tof.ru/Bibl/Bibl_1/Astronavigation_yxta/.html (Дата обращения 10.03.2025).
11. Охотников, А. Л. Высокоточное позиционирование транспортных средств на железнодорожном транспорте / А. Л. Охотников, С. В. Соколов // Труды АО «НИИАС»: Сборник статей. Том 2. Выпуск 11. – Москва: Типография АО «Т 8 Издательские Технологии», 2021. – С. 174-178.
12. Соколов, С.В. Аналитические модели пространственных траекторий для решения задач навигации // Прикладная математика и механика. Т.79. вып.1. 2015. С. 24-30.
13. Градштейн, И.С., Рыжик И.М. / Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. // М.: Физматгиз, 1963. 1100 с.
14. Потехин, Д. С. Метод цифровой обработки сигнала доплеровского сдвига частоты лазерного измерителя скорости / Д. С. Потехин, А. В. Станюш // Системы управления и информационные технологии. – 2010. – № 2(40). – С. 64-67.
15. Титов, В. А. Исследование корреляционного метода определения скорости объекта / В. А. Титов // Science Time. – 2017. – № 5(41). – С. 255-261.
16. Патент № 2837685 С1 Российская Федерация, МПК G01P 3/36. Устройство доплеровского измерителя скорости движущейся поверхности на основе интерферометра с волоконным вводом излучения: заявл. 05.08.2024: опубл. 03.04.2025 / А. Е. Сафронов, Е. А. Чудаков, А. М. Тарасов; заявитель ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ». >>>

17. Погрешности измерения расстояния до препятствия средствами технического зрения и прогноза пути торможения в беспилотных системах управления движением поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина, А. Л. Охотников // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 6(97). – С. 6-12. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-6-1.
 18. Соколов, С. В. Измеритель модуля скорости для подвижных транспортных объектов / С. В. Соколов, А. Л. Охотников // Автоматика, связь, информатика. – 2024. – № 4. – С. 16-18. – DOI 10.34649/AT.2024.4.4.005.
-