



## Применение моделей вероятностных ситуаций на железной дороге



Борис ЛЕВИН



Виктор ЦВЕТКОВ



Андрей ОХОТНИКОВ

*Лёвин Борис Алексеевич – Российский университет транспорта, Москва, Россия.*

*Цветков Виктор Яковлевич – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, Москва, Россия.*

*Охотников Андрей Леонидович – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, Москва, Россия\*.*

Статья описывает применение моделей информационных вероятностных ситуаций для решения задач управления движением на железной дороге. Раскрывается содержание ситуационного управления. Показано различие между визуальной и «слепой» ситуацией при движении транспорта.

Информационная ситуация вокруг подвижного объекта может быть детерминированной и стохастической. Вводится понятие «стохастическая управленческая информационная ситуация». Выбор альтернатив в стохастических управленческих ситуациях характеризуется организационной, технологической и информационной неопределённостями. Это мотивирует разработку методов и алгоритмов управления, учитывающих неопределённость и многокритериальность при управлении подвижными объектами в таких ситуациях. Ситуационное управление может быть использовано в автоматизированном, кибер-физическом и интеллектуальном управлении.

Статья предлагает модель управления подвижными объектами, основанную на вероятностном подходе в стохастической ситуации и учёте ряда стохастических факторов. Модель основана

на расчёте вероятности существования препятствия на пути движения транспортного объекта. Такая модель может применяться в условиях плохой видимости и возможности получения ошибочной информации от датчиков. Статья даёт систематику вероятностных характеристик стохастической информационной ситуации, сопровождающей подвижный объект. Обосновано применение дихотомического и оппозиционного анализа при изучении препятствий на трассе движения. Модель обнаружения постороннего объекта на трассе движения строится на предположении наличия достоверной и ошибочной информации. В качестве основы анализа используется теория Демпстера–Шафера. Модель стохастической информационной ситуации использует вероятностные характеристики наличия препятствия на трассе. Вероятность существования объекта оценивается с помощью теоремы Байеса. Предлагаемая модель учитывает три фактора стохастической ситуации: информационную неопределённость в сигнале, ложные сигналы, погрешность измерений датчиков. Область применения данной ситуационной модели: цифровая железная дорога, интеллектуальные транспортные системы, транспортные кибер-физические системы.

*Ключевые слова:* транспорт, обнаружение объектов, стохастическая информационная ситуация, вероятность событий, ситуационный анализ, теория Демпстера–Шафера.

\*Информация об авторах:

**Лёвин Борис Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, президент Российского университета транспорта, Москва, Россия, [tu@miiit.ru](mailto:tu@miiit.ru).

**Цветков Виктор Яковлевич** – доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя центра стратегического анализа и развития АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия, [svj2@mail.ru](mailto:svj2@mail.ru).

**Охотников Андрей Леонидович** – заместитель руководителя центра стратегического анализа и развития АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС») Москва, Россия, [a.ohotnikov@vniias.ru](mailto:a.ohotnikov@vniias.ru).

Статья поступила в редакцию 01.02.2020, принята к публикации 19.06.2020.

For the English text of the article please see p. 17.

## ВВЕДЕНИЕ

Ситуационное управление в области искусственного интеллекта основано на применении семиотических моделей. Ситуационное управление и ситуационный анализ в области информационного управления и технологий практического управления транспортом основаны на применении моделей информационных ситуаций [1; 2]. Информационная ситуация в сфере транспорта описывает факторы, влияющие на характер движения, включая появление других объектов. Информационная ситуация вокруг подвижного объекта может быть детерминированной и стохастической. Соответственно, модели информационной ситуации могут быть детерминированными и стохастическими. Управление транспортом может быть аналитическим и стереотипным. Аналитическое управление основано на анализе параметров состояния объекта и параметров ситуации. На основе анализа всех параметров вырабатывается решение. Стереотипное управление связано с анализом известных стереотипных ситуаций, для которых известно управляющее решение как возможная альтернатива.

Детерминированная ситуация характеризуется наличием причинно-следственных связей. Стохастическая ситуация характеризуется наличием неопределённости. Выбор альтернатив в стохастических ситуациях характеризуется организационной, технологической и информационной неопределённостями. Это обуславливает разработку методов и алгоритмов управления, учитывающих неопределённость и многокритериальность при принятии решений.

При организационном и автоматизированном управлении уместно говорить о методах управления. При транспортном кибер-физическом управлении [3] целесообразно говорить, в первую очередь, об алгоритмах и, во вторую, о методах управления. При интеллектуальном управлении [4] необходимо говорить о правилах, алгоритмах и методах управления. Информационная ситуация [5; 6] — это модель, объединяющая субъект управления (решатель), объект управления (транспортное средство) и окружение объекта управления, влияющее на его состояние.

Ситуационное управление является звеном, соединяющим автоматизирован-

ное, кибер-физическое и интеллектуальное управление. В данной статье представлены алгоритмы расчёта вероятности существования (определения) препятствия (объекта), которые применяются при организации управления транспортным средством (ТС) без человека с использованием «технического зрения». Представлен алгоритм расчёта вероятности существования на уровне датчиков. Показан механизм слияния вероятностей существования от нескольких датчиков. На прикладном уровне вероятность существования может использоваться в алгоритмах интерпретации [7] ситуации для выполнения различных функций для поддержки принятия решений, например, для помощи машинисту или при управлении ТС без машиниста. В данной работе показан комплексный подход к учёту разных факторов для моделирования дискретных задач управления транспортом.

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СТОХАСТИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

При беспилотном управлении транспортными средствами (ТС) обязательно используется в явной или в неявной форме модель информационной ситуации. При этом применяют разные по масштабу информационные ситуации. Локальная информационная ситуация — это модель, связанная с состоянием и ближайшим окружением транспортного средства. Визуальная информационная ситуация определяется зоной видимости из транспортного средства. «Слепая» информационная ситуация определяется зоной, которая простирается за зону прямой видимости и может оказывать влияние на ТС, и вероятность визуального обнаружения объекта в этой зоне близка к нулю. Кроме того, возникает ещё одна информационная ситуация, называемая стохастической.

Для измерения параметров «слепой» информационной ситуации применяют специальные измерительные средства, которые позволяют отслеживать препятствия на пути движения: радары, лазерные сканеры, фотокамеры, инфракрасные камеры, ультразвуковые сенсоры, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и другие. Все эти средства позволяют построить комплексную систему технического мони-





торинга ситуации и выявления препятствий на пути ТС.

Одна из главных задач управления скоростным и высокоскоростным железнодорожным транспортом состоит в распознавании объектов, препятствующих движению. Поскольку объекты-препятствия не запланированы и возникают случайным образом, то это приводит к возникновению стохастической информационной ситуации. Стохастическая информационная ситуация характеризуется вероятностными и технологическими факторами. Вероятностные факторы следующие:

- вероятностные характеристики наличия препятствия на трассе;
- вероятностные характеристики отсутствия препятствия на трассе;
- вероятность обнаружения препятствия на трассе;
- вероятность необнаружения препятствия на трассе;
- вероятность систематики движения;
- вероятность нарушения систематики движения.

Обращает на себя дихотомия и оппозиционность пар вероятностных оценок. Это даёт основание применять оппозиционный и дихотомический анализ для пространственного анализа. Технологические характеристики стохастической информационной ситуации обусловлены ошибками и сбоями средств наблюдения. В реальных условиях данные от датчиков систем теленаблюдения содержат неопределённость. Возможны ложные сигналы от датчиков типа «эхо». Разумеется, дополнительно надо учитывать погрешность измерений. Все эти три фактора также характеризуют информационную стохастическую ситуацию.

Ложные срабатывания зависят от природных условий. Ложным измерением называют измерение, которое интерпретируется датчиками или алгоритмами обработки информации как измерение реального объекта препятствия, в то время как на самом деле этого объекта нет. Ложные измерения происходят тем чаще, чем больше ситуация, то есть, чем больше зона наблюдений. В локальной ситуации их мало. В видимой информационной ситуации их мало. В слепой информационной ситуации их больше.

Измерение реального объекта называют истинным измерением. В реальной практике сенсоры и датчики генерируют множество истинных и ложных срабатываний. Ложные срабатывания также имеют место от побочных объектов, которые расположены не на трассе движения, а рядом и помехами движению не являются.

При управлении ТС без машиниста необходимо фильтровать побочные объекты, которые присутствуют рядом с путём движения ТС – столбы, светофоры, ограждения. Это важно при управлении высокоскоростным транспортом, при его интегральном управлении [8].

Стохастическая информационная ситуация включает вероятности существования объекта и вероятности ложных срабатываний датчика. Стохастическая информационная ситуация задаёт условия для вероятностного анализа. В частности, для анализа, является ли сигнал об объекте реальным или ложным. Другими словами, стохастическая информационная ситуация допускает наличие неопределённости и требует её раскрытия.

Наличие вероятностных характеристик и характеристик неопределённости ситуации даёт основание говорить о вероятностном ситуационном управлении. Такое управление описывается в рамках теории Демпстера–Шафера (ТДШ) [9].

Вероятностное ситуационное управление использует вероятностный показатель для каждого сигнала обнаруженного объекта. Используя эмпирическую вероятность случайного обнаружения побочных объектов, их можно отфильтровать с помощью установки порога (разделяющей плоскости) в пространстве параметров.

Следует отметить ещё одну особенность стохастической информационной ситуации – визуальная ситуация и слепая информационная ситуация работают с параметрами реального пространства, а также с вероятностными параметрами. Если использовать множественную оценку распознавания объекта в реальном времени, то это повышает качество обнаружения объекта [10–12]. Причина этого в эргодичности процесса пространственных измерений. Использование стохастической информационной ситуации требует использования апробированных статистических

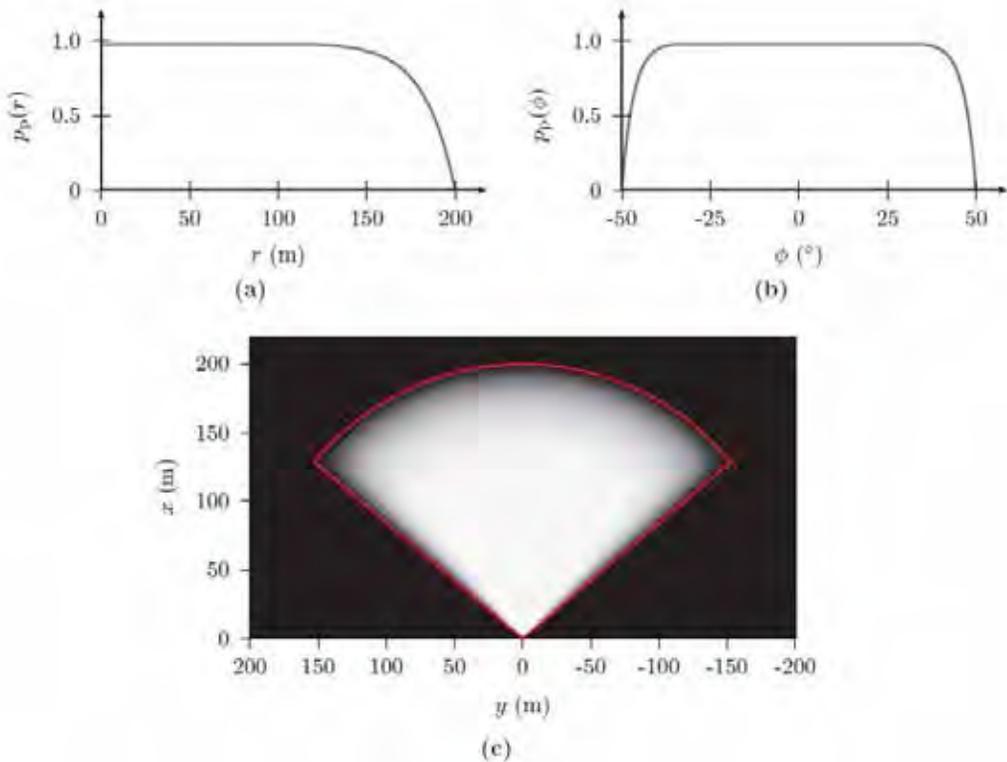


Рис. 1. Моделирование вероятности устойчивости обнаружения в полярных координатах датчика. Модель получена авторами на основе экспериментальных работ.

методов, которые имеют множество реализаций в программном обеспечении. Таким образом, эргодичность и статистические методы являются опорой при анализе стохастической информационной ситуации.

### ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ОБЪЕКТА

Для определения вероятности многих случайных и динамических процессов применяют подход Байеса. С позиций логики это обусловлено тем, что основной силлогизм *modus ponens* является прототипом теоремы Байеса. Теорема Байеса в интерпретации математической логики представляет собой элементарный вывод, который называют *modus ponens* [13]. Теорема Байеса имеет вид:

$$p(x|z) = \frac{p(z|x)p(x)}{p(z)}. \quad (1)$$

В выражении (1)  $x$  – величина, подлежащая оценке,  $p(x)$  – предварительная вероятность величины,  $p(x|z)$  – следующая величина, подлежащая оценке после наблюдения за измерением,  $p(z|x)$  – измерение,

произведённое из оцениваемого значения, и  $p(z)$  – нормализующий фактор. Для упрощения выражения  $p(z)$  его часто заменяют нормализующим фактором  $\eta$  таким, что:  $p(x|z) = \eta p(z|x)p(x)$ . (2)

В выражении (2) величина  $\eta$  гарантирует, что результат оценки правил Байеса среди значения  $x$  и его дополнения составляет 1.

Для вероятности существования объекта истинное значение есть  $x$ , а его дополнение  $\bar{x}$  является вероятностью несуществования объекта. Фактическое измерение или фактофиксирующая модель есть  $z$ . Из (2) получаем:

$$p(x|z) = \eta p(z|x)p(x) = p(\exists x_k | Z^k), \quad (3)$$

$$p(\bar{x} | z) = \eta p(z|\bar{x})p(\bar{x}) = p(\nexists x_k | Z^k). \quad (4)$$

Методика обнаружения объектов на пути движения в стохастических ситуациях основана на анализе вероятностных параметров ситуации. Эти параметры следующие: вероятность появления, вероятность появления объекта приближено к другому, вероятность детектирования, вероятность обнаружения, вероятность беспорядка (шума или помех).



*Вероятность (устойчивости) обнаружения*,  $p_p$  ( $p$ -persistence) есть оценка вероятности существования объекта. Она применялась в аэрокосмической радиолокации, когда были введены IPDA и JPDA [14; 15]. Она интерпретировалась как вероятность устойчивости обнаружения объекта с полем зрений  $360^\circ$  в Марковском процессе. В условиях применения датчиков для автомобилей поле зрения одиночного датчика более ограничено. В условиях применения датчиков для локомотива поле зрения ещё более ограничено, и поэтому вероятность устойчивости обнаружения в этом случае выше. Идея использования угла зрения датчика для моделирования вероятности устойчивости обнаружения была введена вначале для автомобильных ТС и затем для железнодорожных ТС. Эту вероятность иногда называют вероятностью выживания. Общая вероятность устойчивости состоит из комбинации вероятности устойчивости в полярных координатах:

$$p_d^{mod}(r, \phi) = p_p \bullet (r) \bullet p_p(\phi). \quad (5)$$

На рис. 1 показан пример моделирования вероятности устойчивости обнаружения для датчика, обращённого вперёд.

Практические данные такие: максимальное расстояние до объекта  $r = 200$  м и максимальный угол  $\phi = \pm 50^\circ$ . Диапазон и угол отсечки выбирались как  $m_r = 0,4$  и  $m_\phi = 0,3$ , соответственно, а  $\alpha$  – как 0,01, где (а) показано моделирование по расстоянию  $r$ , (б) показано моделирование по углу  $\phi$ , и (в) визуализируется комбинированная вероятность устойчивости в декартовой системе координат.

*Вероятность появления (рождения)*,  $p_b(x_{k|k-1})$  ( $b$ -birth) введена для прогнозирования существования. Эта вероятность используется для инициализации вероятности существования вновь обнаруженного объекта. Самый простой способ моделирования вероятности появления объекта – принять разумное постоянное значение, например,  $p_b(x_{k|k-1}) = 0,1$ . Такая константа должна быть выше порога. Выбор постоянной вероятности появления также является наиболее типичным подходом, используемым на практике в сочетании с IPDA и общими вероятностями взаимосвязанных данных – JPDA [14; 15].

В [11] знание о поле зрения датчика и других обнаруженных объектах используется для определения более точной вероятности появления. Вероятность появления моделируется на основе градиента таким образом, что вероятность устойчивости изменяется пропорционально более высокой вероятности появления. Это приводит к тому, что высокая вероятность появления выбирается по краям угла зрения датчика и по видимости объекта.

*Вероятность появления объекта приближено к другому* в [12] оценивается в предположении, что новые объекты не могут быть созданы в непосредственной близости от уже обнаруженных объектов с высокой вероятностью существования. Функция плотности гипотезы вероятности (PHD – Probability Hypothesis Density) [16] используется для получения вероятности существования объекта в определённой области. Дополнение этой вероятности ко всем объектам в окружающей среде приводит к пространственной вероятности появления любой новой гипотезы появления объекта. Существует множество вариантов моделирования вероятности появления. При выборе модели вероятности появления следует учитывать их простоту или сложность. Тип используемого датчика также влияет на выбор. Например, модель с функцией PHD, представленная в [12], хорошо работает для датчиков, которые могут определять размеры объекта. Другие датчики, такие, как камера, могут больше полагаться на полярную модель вероятности появления, аналогичную модели, представленной в [11].

*Вероятность детектирования*,  $p_d(k)$ , ( $d$ -detection) представляет собой вероятность обнаружения действительного измерения объекта. Вероятность детектирования влияет на вероятность существования. Существует множество способов моделирования этой вероятности, и они варьируются в зависимости от чувствительности датчика.

В [12] вероятность детектирования лазерного сканера моделируется тангажом ТС и координатой  $z$  определяемого объекта, что уменьшает вероятность определения, когда измерительные лучи лазерного сканера находятся выше или ниже определяемого объекта.

Вероятность определения оптическим датчиком камеры также моделируется в [12] с использованием угла зрения камеры, положения определяемого объекта, длины, ширины и ориентации объекта.

Вероятность определения также может быть получена непосредственно из классификатора, например, алгоритмов машинного обучения Adaptive Boosting для камеры [11]. Простейшим решением для моделирования вероятности детектирования является выбор соответствующей константы.

Существует общий подход, в котором вероятность детектирования представляет собой комбинацию трёх значений: смоделированная вероятность детектирования  $p_d^{mod}(x_{k|k-1})$ , вероятность измерения  $p_d^{meas}(z_k)$  и вероятность отражения сигнала от объекта  $p_d^{track}(x_{k|k})$ :

$$p_d(k) = p_d^{mod}(x_{k|k-1}) p_d^{meas}(z_k p_d^{track}(x_{k|k})). \quad (6)$$

Если измерение не было связано с объектом, то  $p_d^{meas}(z_k)$  и  $p_d^{track}(x_{k|k})$  просто игнорируются. Смоделированная вероятность определения  $p_d^{mod}(x_{k|k-1})$  зависит от прогнозируемого состояния измерений, а информация о самих измерениях не учитывается. Идея состоит в том, чтобы смоделировать факт того, что любое местоположение в поле зрения датчика зависит от вероятности того, что датчик сможет произвести действительное измерение в этом месте, где объект должен быть. Самый простой метод основан на предположении того, что датчик может обнаружить объект везде, где он существует. Это приводит к постоянному значению для  $p_d^{mod}(x_{k|k-1})$ . Такого предположения может быть достаточно во многих случаях. Модель, которая учитывает чувствительность по углу зрения датчика, улучшает данную модель. Другие свойства датчика, такие как априорное пространственное соотношение сигнал/шум, можно также учесть, особенно для радиолокационных датчиков. Комбинация – моделирование, измерение и вероятность определения объекта – повышают вероятность правильной оценки.

Вероятность беспорядка (шум) часто моделируется как пространственный процесс на основе распределения Пуассона для

обнаружения [11]. Это вероятность того, что ложное измерение происходит в данной области или в течение заданного периода времени. Распределение Пуассона служит для оценки вероятности того, что  $m$  измерений являются ложными измерениями в момент времени  $k$ , обозначаемый как множество ложных измерений  $Z_k^F$ , и является выражением:

$$p_c(|Z_k^F| = m; \lambda) = \frac{\lambda^m e^{-\lambda}}{m!}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – параметр уровня пуассоновского процесса.

Параметр уровня, в зависимости от применения процесса Пуассона, может быть определён как единичное возникновение события в случае ложного измерения. Вероятность событий того, что  $m$  ложных измерений произошло, задаётся суммой:

$$p_c(|Z_k^F| \leq m; \lambda) = \sum_i^{|Z_k^F|} P \frac{\lambda^m e^{-\lambda}}{m_i!}. \quad (8)$$

Для применения выражения (8) необходимо оценить количество потенциальных ложных измерений  $|Z_k^F|$  и параметр уровня интенсивности  $\lambda$ . Все рассмотренные параметры в совокупности определяют вероятностную информационную ситуацию, которая характеризуется выражением (8).

При обнаружении препятствий один из вариантов анализа объектов, которые определяются датчиками, достигается путём дискретного перебора вероятностей существования объекта. Можно ввести три пороговых уровня для характеристики объекта: порог подтверждения объекта ( $\tau_c$ ), порог неподтверждения объекта ( $\tau_{uc}$ ) и порог удаления объекта ( $\tau_d$ ).

Если вероятность существования объекта достигает порога подтверждения  $\tau_c$ , он причисляется к подтверждённым и включается в список объектов, которые датчик точно определяет и обнаруживает. Если вероятность существования объекта падает ниже порога неподтверждения  $\tau_{uc}$ , объект не считается достоверным объектом, но по-прежнему хранится во внутреннем списке объектов датчика.

Для практических целей порог неподтверждения должен быть выбран таким, что  $\tau_{uc} < \tau_c$ , то есть имеет место эффект обнаружения объектов, проверенных в течение



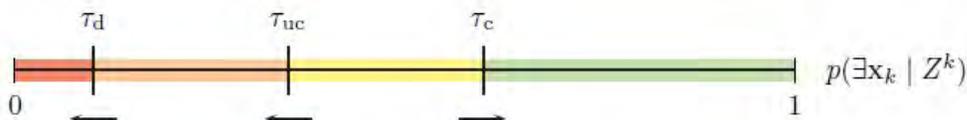


Рис. 2. Пороги существования для подтверждения и удаления объектов. Модель получена авторами на основе теоретических исследований и выдвижения гипотезы о таком соотношении порогов.

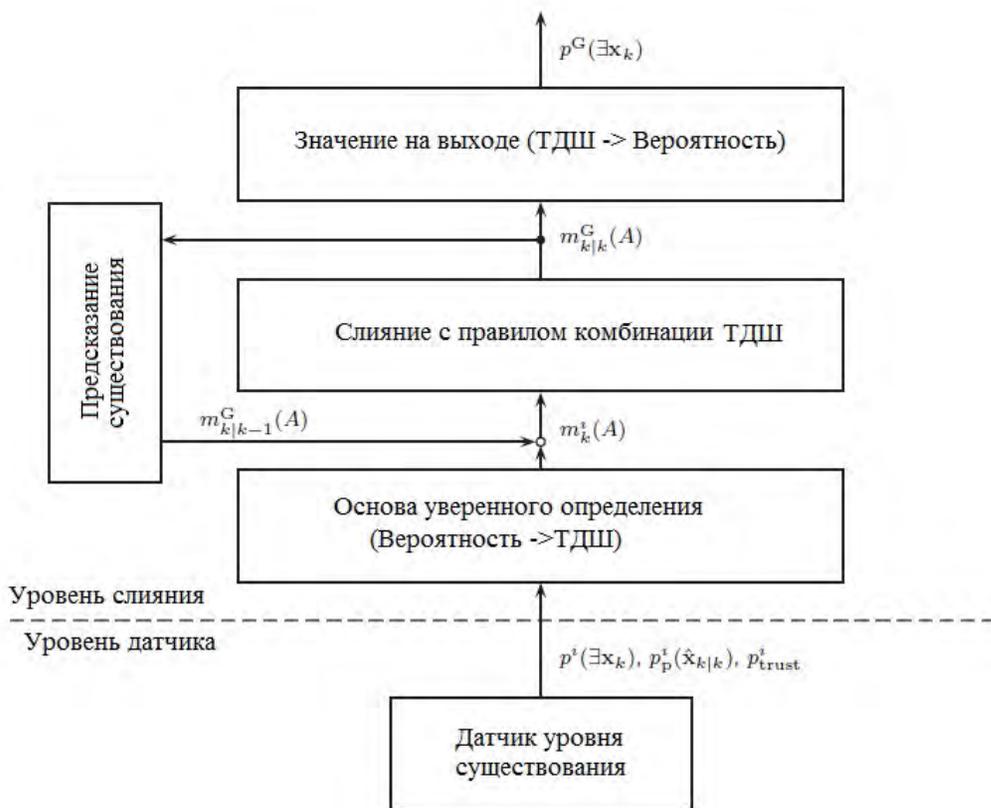


Рис. 3. Оценка вероятности существования от нескольких датчиков с использованием теории доказательств Демпстера–Шафера. Схема составлена авторами на основе обобщения вышерассмотренных алгоритмов.

длительного периода времени, если они уже достигли  $\tau_c$  когда-то в своей истории. Это фактор эргодичности.

Если вероятность существования объекта падает ниже, он достигает порога удаления  $\tau_d$  и полностью удаляется из списка объектов, обнаруживаемых датчиком. Рис. 2 показывает отношения между различными порогами существования. Пороговые значения следует выбирать таким образом, чтобы частота обнаружения (истинные положительные и ложные положительные значения) на пороговых значениях гарантировала определённый

желаемый уровень в ситуации движения для данного ТС.

В силу этого возможно определение нескольких порогов подтверждения, особенно для ТС разных скоростных режимов. Каждый порог соответствует разной интенсивности обнаружения. В итоге вероятность существования задаёт параметр «логической надёжности» обнаружения объекта. Такая логическая надёжность может использоваться как фактор помощи машинисту. Например, в интеллектуальной системе безопасности при экстренном торможении с задержкой. Это случай ре-

акции только на объекты, которые соответствует самым высоким значениям порога. Для сравнения «мягкие» системы торможения [17], такие, как адаптивный круиз-контроль, будут реагировать раньше, при определении объектов, которые отвечают нижнему порогу подтверждения.

При комплексном анализе слияния ситуаций необходимо объединить вероятность существования объекта от нескольких датчиков в общий список объектов, используя стратегию интеграции измерений датчиков с общим списком.

Интерфейс объектной модели рассматривает вероятность существования как единственную вероятность, обычно полученную из байесовского алгоритма оценки или из алгоритма IPDA/JIPDA [14; 15]. Однако для того, чтобы воспользоваться преимуществами работы различных датчиков и справиться со сложными ситуациями, такими, как непрозрачность (окклюзии), одного значения для моделирования вероятности существования на уровне слияния недостаточно. Поэтому вероятность существования моделируется с помощью ТДШ в модуле слияния, как будет описано далее, а затем преобразуется обратно в единственное значение вероятности существования на выходе модуля слияния. Поток обработки для слияния вероятностей существования показан на рис. 3.

## СИТУАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ ДЕМПСТЕРА–ШАФЕРА

Моделирование и интеграция с теорией ТДШ описано в [18] для трансформации измерений от датчика к датчику. В этом случае используется тот же метод анализа вероятностей. Подробный обзор теории доказательств Демпстера–Шафера (ДШ) и её многочисленных приложений приведены в [9].

Теория ДШ определяет систему распознавания объектов, состоящую из взаимоисключающих гипотез или состояний системы. Для моделирования существования наиболее простым набором взаимоисключающих гипотез является то, что объект существует,  $\exists$ , или не существует,  $\nexists$ , такой, что:

$$\Theta = \{\exists, \nexists\}. \quad (9)$$

Затем ТДШ определяет множество значений  $2^\Theta$ , которое является набором всех подмножеств  $\Theta$ , включая пустое множество  $\emptyset$ . Для моделирования существования, как определено в (9), это приводит к выражению (10):

$$2^\Theta = \{\emptyset, \{\exists\}, \{\nexists\}, \{\exists, \nexists\}\}. \quad (10)$$

Множество значений содержит все комбинации, которые позволяют присваивать значения доверия не только для взаимоисключающих гипотез, но и для их комбинаций. Это может быть использовано для моделирования незнания или неопределённости в измерениях от нескольких датчиков, которые могут иметь различные характеристики точности (оптические камеры, радары, лидары). Моделирование неопределённости допустимо в выводах для традиционных байесовских методов. Множество значений для существования объекта включает подмножество  $\{\exists, \nexists\}$ , которое включает значения доверия с информацией о существовании объекта, которая неоднозначна. Для каждого множества значений определяют базовое значение доверия (ВВА-Basic Belief Assignment), часто называемое также массовой функцией, где:  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ .

Базовое значение доверия ВВА, или массовая функция, представляет собой количество измерений таких, что каждый элемент из 2 верных будет считаться правдоподобным. Если ВВА используется только для взаимоисключающих гипотез, то ТДШ эквивалентна традиционным байесовским методам. Назначение ВВА для множества значений должна быть отрегулирована таким образом, чтобы:

$$\sum_{A: A \in \Theta} m(A) = 1. \quad (12)$$

Кроме того, ТДШ определяет функцию веры (доверия):

$$Bel(A) = \sum_{B: B \subseteq A} m(B), \quad (13)$$

которая содержит базовое значение доверия (ВВА) для всех подмножеств  $A$ , которое может быть интерпретировано как нижняя граница вероятности показаний для  $A$ . Вероятность верхней границы для показаний во множестве значений  $A$  определяется как правдоподобие:

$$Pl(A) = \sum_{B: B \cap A \neq \emptyset} m(B), \quad (14)$$

где  $Pl(A)$  содержит все множества в (2), которые поддерживают меру доверия в  $A$ .





**Рис. 4. Информационная ситуация плохой видимости, требующая вероятностной оценки.**  
 [Электронный ресурс]: <https://railvision.io/main-line-solution/>.

Эта разница между доверием и правдоподобием представляет собой сумму неопределённости в показаниях для *A*.

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Для обнаружения препятствий на практике обязательным стало применение «технического» или «машинного зрения» для помощи машинисту, особенно в условиях плохой видимости. Глаз человека не способен определить некоторые объекты, когда видимость недостаточно хорошая. Так зимой, когда снег заметает рельсовые пути и скрывает препятствия, важно точно определять, как же вести поезд. На помощь приходят различные алгоритмы и математические модели для комплексирования данных, которые приходят от датчиков. Данные приходится фильтровать по зоне интереса относительно рельсовой колеи, проводить ассоциацию объектов, инициализацию новых объектов, обновляя состояние существующих объектов, и при помощи моделирования с применением ТДШ управлять стохастическими объектами, т.е. подтверждать или удалять из базы знаний. На рис. 4. приведена информационная ситуация плохой видимости, которая находится между «видимой» и «слепой».

По зарубежным данным, вероятностная система обнаружения препятствий при движении поезда по железнодорожной магистрали может работать на дистанциях

до 2000 м при скоростях до 200 км/ч, например, система RODS – Rail Obstacle Detection System<sup>1</sup>. Данная система обнаружения препятствий на железнодорожном пути выявляет препятствие и передаёт машинисту поезда сигналы тревоги в реальном времени.

Это автономная система (рис. 5) направлена на решение более 80 % связанных с погодными условиями трудностей обнаружения препятствий путём расширения диапазона визуализации для машиниста более чем в четыре раза, тем самым она предотвращает дорогостоящие и опасные события, не допуская аварийные ситуации и обеспечивая безопасность движения.

Решение RODS предлагает в помощь машинисту или оператору (в случае дистанционного управления) полный визуальный контроль с применением отдельно стоящего, установленного на крыше комплекта оборудования для визуализации. Для этого применяются современные электрооптические датчики (в видимом и тепловом диапазоне) (рис. 6), с возможностями слияния данных. На рис. 6 показано распознавание объекта, основанное на вероятностных моделях. Такое распознавание не под силу человеку. Распознавание основано на вероят-

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]: <https://www.railvision.io/the-platform/main-line-vision/>. Доступ 12.01.2020.

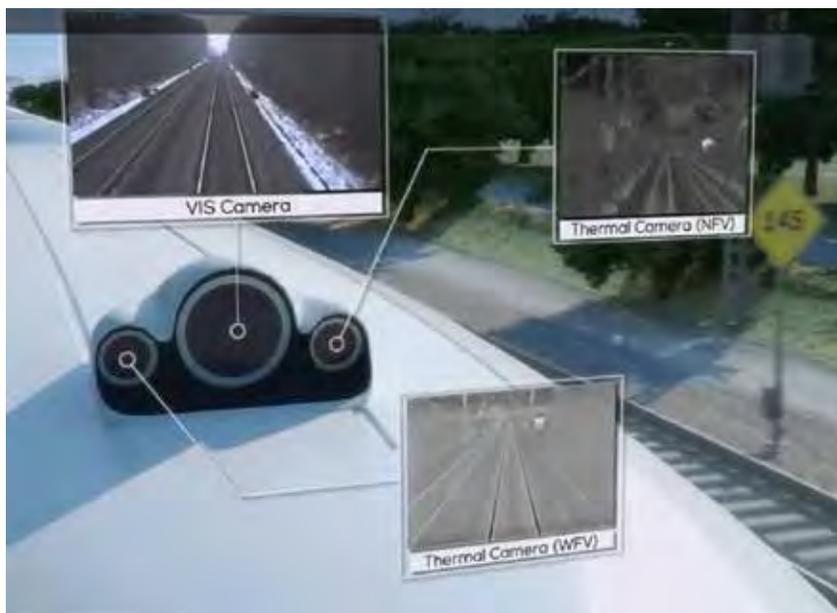


Рис. 5. Система поддержки вождения, направленная на обнаружение препятствий.  
 [Электронный ресурс]: <https://railvision.io/main-line-solution/>.

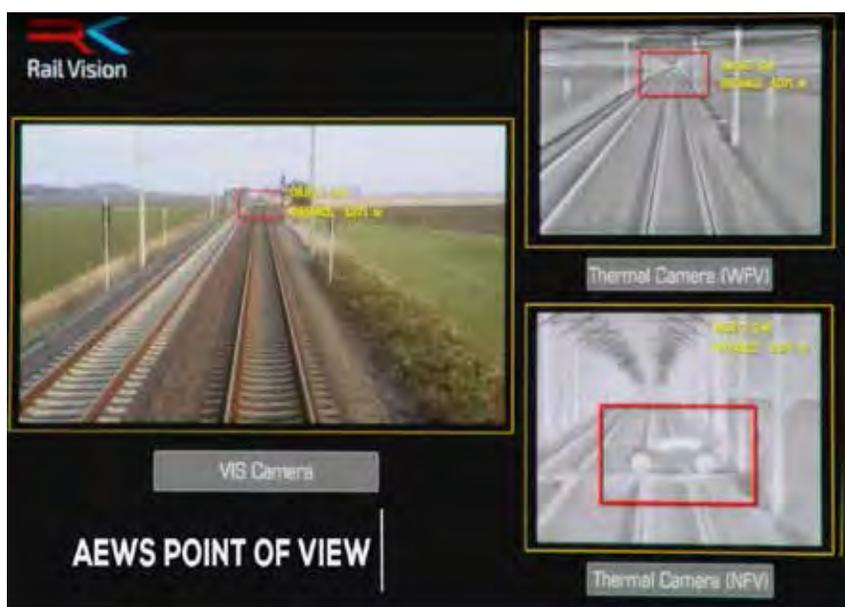


Рис. 6. Система обнаружения препятствий, основанная на ситуационном вероятностном анализе.  
 [Электронный ресурс]: <https://railvision.io/main-line-solution/>.

ностном анализе и использовании библиотеки образов.

Такая технология позволяет оператору и машинисту получать аварийные оповещения в режиме реального времени для принятия решения при движении, снижая расходы, связанные с возможным ущербом или гибелью людей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель информационной вероятностной ситуации и анализа на её основе может быть использована для управления в автоматизированных и в транспортных кибер-физических системах. По существу, данный подход является применением поэлементного (операционного) системного



анализа применительно к области вероятностной логики [19]. Особенностью подхода в данной работе является замена понятия «альтернатива» понятием «альтернативные информационные ситуации», которое затем трансформируется в «вероятностные информационные ситуации». Альтернативная информационная ситуация является более структурированной моделью с рядом ограничений, которые привязывают её к транспортной сфере. Информационная транспортная ситуация имеет тринитарную сущность: побочные объекты, объект управления и семантическое окружение объекта управления. Семантическое окружение пространственного объекта и его образа является качественным отличием данного метода. Оно означает использование пространства параметров из библиотеки образов для сопоставления с пространственными образами, зафиксированными с помощью датчиков. Введение вероятностных параметров в параметры информационной ситуации даёт возможность применять теорию Демпстера–Шафера и автоматически становится советующим экспертным методом, применимым в транспортных кибер-физических системах.

## ЛИТЕРАТУРА

- Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Объектные и ситуационные модели при управлении транспортом // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – № 2 (2). – С. 2–10. [Электронный ресурс]: [http://www.vniias.ru/images/img/online\\_journal/pdf/02\\_2017/06\\_2017.pdf](http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/02_2017/06_2017.pdf). Доступ 11.05.2020.
- Титов Е. К. Информационное ситуационное управление // Государственный советник. – 2019. – № 1 (25). – С. 51–56. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnoe-situatsionnoe-upravlenie/pdf>. Доступ 11.05.2020.
- Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Кибер-физические системы в управлении транспортом // Мир транспорта. – 2018. – № 2 (75). – С. 138–145. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/viewFile/1441/1717>. Доступ 11.05.2020.
- Коваленко Н. И. Извлечение знаний для интеллектуальных транспортных систем // Перспективы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 45–52. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/izvlechenie-znaniy-dlya-intellektualnyh-transportnyh-sistem/pdf>. Доступ 11.05.2020.
- Tsvetkov, V. Ya. Information Situation and Information Position as a Management Tool. European researcher. Series A. 2012, Vol. 36, Iss. 12 (1), pp. 2166–2170. [Электронный ресурс]: <http://docplayer.ru/25906936-Information-situation-and-information-position-as-a-management-tool-viktor-ya-tsvetkov.html>. Доступ 11.05.2020.
- Павловский А. А., Охотников А. Л. Информационная транспортная ситуация // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – № 2 (6). – С. 16–24. [Электронный ресурс]: [http://www.vniias.ru/images/img/online\\_journal/pdf/02\\_2018/2\\_2018.pdf](http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/02_2018/2_2018.pdf). Доступ 11.05.2020.
- Павловский А. А. Формальная интерпретация // Перспективы науки и образования. – 2017. – № 4 (28). – С. 18–22. [Электронный ресурс]: [https://www.elibrary\\_29904637\\_56184823.pdf](https://www.elibrary_29904637_56184823.pdf). Доступ 11.05.2020.
- Цветков В. Я. Интегральное управление высокоскоростной магистралью // Мир транспорта. – 2013. – № 5 (49). – С. 6–9. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/441>. Доступ 11.05.2020.
- Охотников А. Л. Применение теории Демпстера–Шафера для оптимизации перевозок // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – № 4 (8). – С. 61–74. [Электронный ресурс]: [http://www.vniias.ru/images/img/online\\_journal/pdf/01\\_2019/01\\_2019.pdf](http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/01_2019/01_2019.pdf). Доступ 11.05.2020.
- Musicki, D., Evans, R. Joint Integrated Probabilistic Data Association: JIPDA. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 40, No. 3, pp. 1094–1099, July 2004. DOI: 10.1109/TAES.2004.133748.
- Mahlisch, M., Ritter, W., Dietmayer, K. De-cluttering with Integrated Probabilistic Data Association for Multisensor Multitarget ACC Vehicle Tracking. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey, June 2007, pp. 178–183. DOI: 10.1109/IVS.2007.4290111.
- Munz, M., Maehlich, M., Dickmann, J., Dietmayer, K. Probabilistic Modeling of Sensor Properties in Generic Fusion Systems for Modern Driver Assistance Systems. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, San Diego (CA), USA, June 2010, pp. 760–765. DOI: 10.1109/IVS.2010.554804.
- Кудж С. А., Цветков В. Я. Логика и алгоритмы: Монография. – М.: МАКС Пресс, 2019. – 112 с.
- Wenbo, He; Hoang, Nguyen; Xue, Liu; Nahrstedt, K.; Abdelzaher, T. iPDA: An integrity-protecting private data aggregation scheme for wireless sensor networks. MILCOM 2008–2008 IEEE Military Communications Conference. IEEE, 2008. pp. 1–7. [Электронный ресурс]: <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/11413/iPDA%20An%20Integrity-Protecting%20Private%20Data%20Aggregation%20Scheme%20for%20Wireless%20Sensor%20Networks.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Доступ 11.05.2020.
- Musicki, D., Evans, R. Joint integrated probabilistic data association: JIPDA. IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2004. Vol. 40, Iss. 3, pp. 1093–1099. DOI: 10.1109/TAES.2004.133748.
- Ba-Ngu, Vo; Wing-Kin, Ma. The Gaussian mixture probability hypothesis density filter. IEEE Transactions on signal processing, 2006. Vol. 54, Iss. 11, pp. 4091–4104. DOI: 10.1109/TSP.2006.881190.
- Охотников А. Л., Дзюба Ю. В. Мягкое ситуационное управление // Сб. Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018). Труды седьмой научно-техн. конференции. – 2018. – С. 62–64. [Электронный ресурс]: [https://www.elibrary\\_36916645\\_17254769.pdf](https://www.elibrary_36916645_17254769.pdf). Доступ 11.05.2020.
- Aeberhard, M., Paul, S., Kaempchen, N., Bertram, T. Object Existence Probability Fusion using Dempster–Shafer Theory in a High-Level Sensor Data Fusion Architecture. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Baden-Baden, Germany, June 2011, pp. 770–775. DOI: 10.1109/IVS.2011.594043.
- Господинов С. Г. Вероятностно логический анализ // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2019. – № 1. – С. 3–8. [Электронный ресурс]: [http://www.vniias.ru/images/img/online\\_journal/pdf/03\\_2019/03\\_2019.pdf](http://www.vniias.ru/images/img/online_journal/pdf/03_2019/03_2019.pdf). Доступ 11.05.2020.