

Исследование зависимости точности качественных матриц корреспонденции от точности оборудования и его размещения на дорожной сети



С.В. Жанказиев,
д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Организация
и безопасность движения»
Московского автомобильно-
дорожного государственного
технического университета
(МАДИ)

Качественные матрицы корреспонденции предоставляют основные исходные данные на этапе как проектирования, так и функционирования систем косвенного управления транспортными потоками. Описаны подходы к определению зависимости точности качественных матриц корреспонденции от точности применяемого оборудования и способа его размещения на дорожной сети. Приведены задачи, которые можно решить с помощью полученной зависимости.



А.И. Воробьев,
канд. техн. наук, доцент
кафедры «Организация
и безопасность движения»
МАДИ

Управление транспортными потоками, представляющее собой технологическую основу большинства моделей интеллектуальных транспортных систем, можно разделить по технологическому принципу их функционирования на два типа:

- 1) директивное управление транспортными потоками (ДУТП);
- 2) косвенное управление транспортными потоками (КУТП).

Принцип ДУТП заключается в системе безальтернативного ограничения движения транспортного потока (ТП) с использованием светофоров, знаков ПДД и т. п. Такой принцип управления достаточно подробно освещался в отечественной и зарубежной литературе с середины 1950-х годов.

Принцип КУТП заключается в системе побудительных приемов для выбора наиболее эффективного направления в условиях и на участках дорог с возможностью принятия альтернативных решений по направлению движения. Для реализации принципа КУТП обычно применяют динамические информационные табло (ДИТ), расположенные на дорожной сети.

В рамках систем КУТП интересы участников дорожного движения (УДД) – сокращение времени проезда через заданный участок дороги – сов-

падают с интересами города (региона), требующего организовывать движение таким образом, чтобы повышать пропускные параметры дорог благодаря оптимизации перераспределения ТП на улично-дорожной сети [1].

Полноценно функционирующая система КУТП позволяет улучшить индикаторы эффективности:

- 1) снизить время в пути вследствие разгрузки основных маршрутов движения ТП;
- 2) повысить пропускную способность за счет перераспределения ТП по альтернативным маршрутам;
- 3) снизить экологическую нагрузку в результате оптимизации режима работы транспортной сети;
- 4) повысить доверие к системе организации дорожного движения в целом за счет актуального информационного обеспечения УДД.

Понятие качественной матрицы корреспонденции

Процесс разработки систем КУТП представляет собой строгую последовательность задач:

- 1) определение участка улично-дорожной сети (УДС);
- 2) разработка технологии КУТП;
- 3) предварительное определение области установки ДИТ;

- 4) разработка технических требований к ДИТ;
- 5) финальное определение области установки ДИТ;
- 6) расчет индикаторов эффективности функционирования систем КУТП;
- 7) корректировка технологии при неудовлетворительных показателях индикаторов эффективности (рис. 1).

Отдельные компоненты технологического процесса систем КУТП изучены сегодня достаточно подробно [1–4], но исследования подходов к определению требований к начальной части технологической составляющей – сбору и обработке исходных данных, необходимых для разработки систем КУТП, – находятся на зачаточном уровне.

В мировой практике большинство решений КУТП принимаются на основе анализа матриц корреспонденций ТП, полученных при помощи различных математических моделей обработки данных об интенсивности и перераспределения ТП на перекрестках рассматриваемого участка УДС.

Критериями оценки точности таких моделей выступают погрешности в определении интенсивности ТП и параметров перераспределения ТП. Однако данный метод несмотря на высокую достоверность полученных данных и характеристик имитационных моделей имеет существенный недостаток: невозможно определить маршруты движения транспортных средств (ТС), если на рассматриваемом участке УДС имеются хотя бы одно примыкание к основной дороге и хотя бы один съезд после примыкания. Этот недостаток не имеет значения, если в наличии:

- 1) один объект притяжения (ОП);
- 2) не более одного альтернативного маршрута;
- 3) несколько ОП с единым альтернативным маршрутом.

Информация о маршрутах движения ТС как часть технологической составляющей систем КУТП получила название качественной матрицы корреспонденции (КМК) [5, 6]. Основное отличие КМК от простых матриц корреспонденции заключается в том, что она содержит информацию не только об истоках, ОП и параметрах ТП, связанных с ними, но и об основных маршрутах движения ТС и количественных характеристиках ТП, следующих данными маршрутами.

Непосредственно с помощью КМК осуществляются следующие операции:

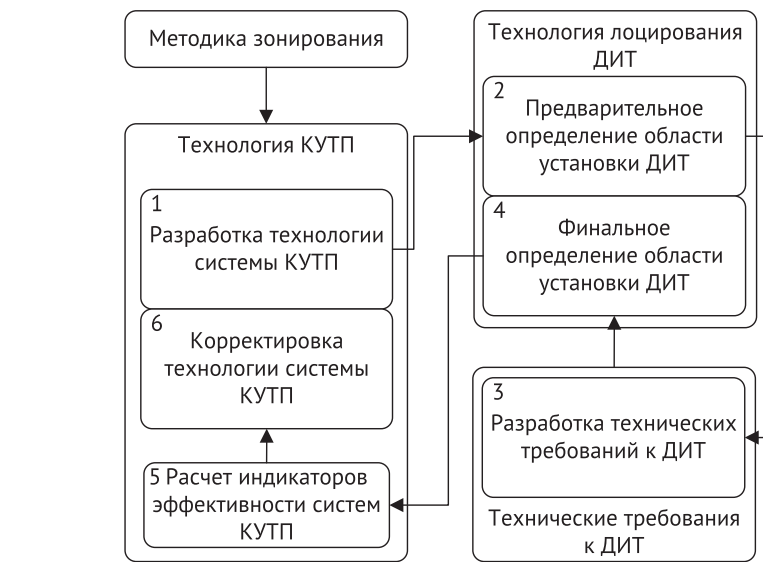


Рис. 1. Процесс разработки систем КУТП

1) создание уточненной матрицы объектов притяжения (МОП) – массива списков основных объектов притяжения транспортных потоков (стоков), расположенных в пределах принятой области распространения системы КУТП с указанием их времени жизни, величины и характера (исходящего или транзитного) транспортного потока,

2) создание банка стандартных сообщений (БСС) – иерархического списка шаблонов стандартных сообщений, актуализированного для области распространения (зоны) системы КУТП и

определения мест предоставления информации УДД;

3) проведение предварительного определения мест информирования УДД (рис. 2).

Таким образом, КМК – одна из ключевых частей технологической составляющей систем КУТП.

Сегодня доступен метод идентификации ТС с помощью дорожной инфраструктуры, а именно – оптическое распознавание государственных регистрационных знаков.

Применение законов теории вероятности при расчете точности маршрутов

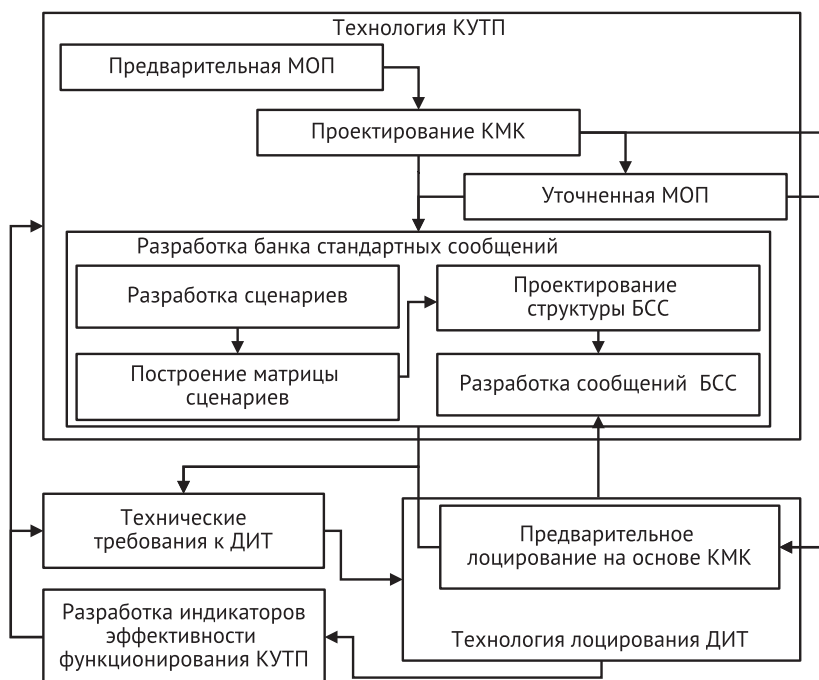


Рис. 2. Схема процесса проектирования систем КУТП

позволит определить наилучший вариант развития событий, т. е. минимальную гарантированную точность маршрутов, что входит неотъемлемой составляющей в проектирование систем КУТП.

Вывод уравнения зависимости точности качественной матрицы корреспонденции от точности оборудования и его расстановки на улично-дорожной сети

С позиций математики идентификация ТС с помощью дорожной инфраструктуры представляет собой случайное независимое испытание, при этом событием является успешная идентификация ТС, вероятность наступления которого зависит от точности применяемого оборудования. Независимость испытаний обусловлена тем, что результат идентификации ТС на одном участке дороги не оказывает влияния на вероятность успешной идентификации ТС на других участках. Следовательно, за основу расчетов минимальной точности маршрутов движения ТС следует принять формулу Бернулли:

$$P_n(i) = C_n^i \cdot p_{\text{от}}^i \cdot q_{\text{от}}^{n-i}, k = 0 \dots n,$$

где n – общее количество идентификационных блоков (ИБ), расположенных на маршруте; i – количество ИБ, на которых ТС было идентифицировано; $P_n(k)$ – вероятность распознавания на k любых ИБ из n ; $C_n^i = \frac{n!}{(n-i)! \cdot i!}$ – число сочетаний

i распознаваний из n ИБ; $p_{\text{от}}$ – точность ИБ; $q_{\text{от}}$ – погрешность ИБ.

Кроме того, для каждого маршрута движения соблюдается правило полной группы, т. е. сумма всех возможных комбинаций успешных идентификаций ТС равна единице:

$$P_n(0) + P_n(1) + P_n(2) + P_n(3) + \dots + P_n(k) = 1.$$

Стоит отметить, что формула Бернулли применима только в том случае, если точность идентификации ТС на каждом ИБ одинакова. Значит, формулу следует применять только для определения оптимального сочетания технических характеристик ИБ и способа их размещения на этапе проектирования систем КУТП. На этапе функционирования систем КУТП выполнение условия равной точности идентификации ТС на всех ИБ маловероятно, следовательно, текущую минимальную точность КМК нужно рассчитывать с помощью теоремы умножения вероятностей и правила полной группы в рамках маршрутов движения ТС.

Стоит отметить, что при использовании КМК неудачная идентификация хотя бы на одном ИБ влечет за собой невозможность построения полного маршрута движения ТС, что сводит расчет точности маршрута движения ТС к примитивному расчету вероятности успешной идентификации на всех ИБ, через которые двигалось ТС:

$$P_m = P_n(n) = p_{\text{от}}^n.$$

Однако при неудачной идентификации ТС в некоторых случаях есть возможность частичного восстановления точности маршрутов.

1. Если ТС не могло объехать участок дороги, на котором оно не было идентифицировано, в силу каких-либо обстоятельств: объезд перекрыт в связи с проведением ремонтно-строительных работ и др. (рис. 3а). В этом случае величина восстановления точности равна вероятности неудачной идентификации только на рассматриваемом ИБ. Форму-

ла точности маршрута будет выглядеть следующим образом:

$$P = p_{\text{от}}^5 + q_{\text{от}} \cdot p_{\text{от}}^2,$$

где $q_{\text{от}} \cdot p_{\text{от}}^2$ – вероятность неудачной идентификации только на отмеченном ИБ.

2. Если на объезде участка дороги, на котором не идентифицировалось ТС, также установлен один или более ИБ (рис. 3б) и ни на одном из них не идентифицировалось рассматриваемое ТС. В таком случае величина восстановления точности равна произведению вероятности успешной идентификации ИБ, установленного на объезде, и вероятности неудачной идентификации только на рассматриваемом ИБ. Формула точности маршрута:

$$P = p_{\text{от}}^5 + p_{\text{от}} \cdot q_{\text{от}} \cdot p_{\text{от}}^2.$$

3. Если неудачная идентификация никак не влияет на процесс определения маршрута, т. е. маршрут движения ТС будет очевиден (рис. 3в). В данном случае величина восстановления точности, как и в первом случае, равна вероятности неудачной идентификации только на рассматриваемом ИБ. Формула точности маршрута:

$$P = p_{\text{от}}^4 + 2 \cdot q_{\text{от}} \cdot p_{\text{от}}^5,$$

где $q_{\text{от}} \cdot p_{\text{от}}^5$ – вероятность неудачной идентификации только на отмеченном ИБ; 2 – коэффициент, указывающий количество рассматриваемых случаев, которые могут наступить в рамках рассматриваемого маршрута (в рамках приведенного примера неудачная идентификация только на ИБ № 1 равнозначна неудачной идентификации только на ИБ № 2).

Можно заметить, что все перечисленные варианты восстановления точности маршрутов подчиняются одному закону, который можно выразить в виде:

$$P = p_{\text{от}}^n + \alpha \cdot k \cdot q_{\text{от}} \cdot p_{\text{от}}^{n-1},$$

где α – доля ТП, которые можно восстановить, равная вероятности успешной идентификации хотя бы на одном ИБ, расположенном на объезде (если имеется несколько вариантов объезда, то принимается во внимание тот, на котором расположено наименьшее количество ИБ); k – коэффициент, указывающий количество возможных идентичных случаев; $q_{\text{от}} \cdot p_{\text{от}}^{n-1}$ – вероятность неудачной идентификации только на одном ИБ.

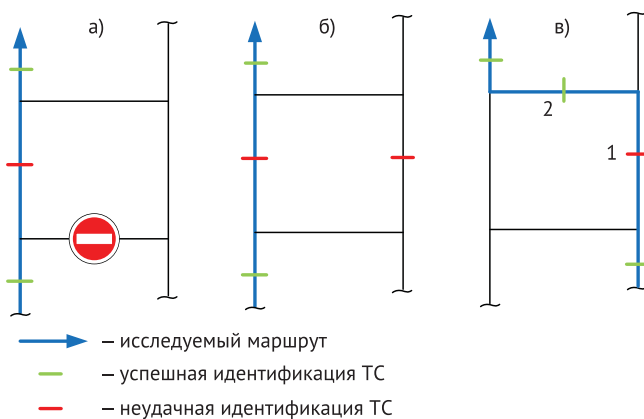


Рис. 3. Примеры восстановления точности маршрута в случае: а) невозможности объезда участка дороги, на котором ТС не было идентифицировано; б) если на объезде участка дороги, на котором ТС не идентифицировалось, установлен один или более ИБ; в) если маршрут движения ТС очевиден

Перечисленные варианты восстановления маршрутов пригодны на этапах как проектирования, так и функционирования систем КУТП. Во время функционирования систем можно рассчитать среднее время движения ТС по различным участкам рассматриваемых УДС. Следовательно, можно восстановить маршруты путем расчета и анализа такого параметра, как среднее время движения ТС. Однако если значение этого параметра для участка основного маршрута приблизительно равно времени движения ТС по альтернативному участку, то восстановление на основании полученных данных будет невозможно.

На участках дорог, где расположены ОП или исток ТП, неудачную идентификацию нельзя восполнить, поэтому невозможно построить полный маршрут. Таким образом, повышение точности на указанных участках дорог зависит только от технических характеристик идентификационного оборудования и от того, как именно оно установлено (погрешности оптического распознавания, связанные с вертикальным и горизонтальным углами наклона, а также с углом крена видеокamera).

Следует учесть и тот факт, что для каждого участка дороги могут существовать различные условия идентификации как на основных, так и на альтернативных маршрутах (различное количество ИБ и, как следствие, различные значения α и k), в таком случае формула приобретает вид

$$P_m = P_n(n) + \sum_{j=1}^n (P_n(n-j) \cdot \sum_{m=1}^n (\alpha_m \cdot k_m)),$$

где m – количество ИБ, расположенных на объезде; $\alpha_m = 1 - q^m$ – вероятность успешной идентификации хотя бы на одном из m ИБ; $P_n(n-j)$ – вероятность неудачной идентификации одновременно на j ИБ только для одного сочетания j ИБ из n ; k_m – коэффициент, обозначающий количество сочетаний рассматриваемых α_m и $P_n(n-j)$.

Выведенное уравнение учитывает три параметра:

- 1) точность маршрута (P_n);
- 2) точность ИБ ($p_{\text{ИБ}}$);
- 3) способ размещения ИБ.

В связи с этим с помощью выведенного уравнения можно решить задачи различных типов:

1) определение минимальной точности и варианта расстановки ИБ на рассматриваемом участке УДС для до-

стижения минимальной необходимой точности КМК; такая задача возникает при проектировании новых систем, когда задана только минимальная необходимая точность КМК и на УДС не установлено оборудование, предназначенное для идентификации ТС;

2) расчет минимальной гарантированной точности КМК, которую может обеспечить установленные на УДС ИБ; применяется для определения возможности осуществления КУТП на основе КМК, полученных от установленного оборудования; задача возникает при внедрении систем КУТП на участки УДС, на которых установлено оборудование для идентификации ТС, например системы фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения;

3) определение минимальной точности ИБ при заданных возможных местах их установки; задача возникает при ограниченных возможностях размещения ИБ на УДС (например, запрет на размещение ИБ на определенных участках дорог федеральными службами безопасности);

4) определение оптимального варианта расстановки ИБ на УДС для достижения заданной точности КМК при заданной точности ИБ; задача возникает при ограничении, наложенном на выбор ИБ, например, условия выполняемого контракта, допускающие применение определенного оборудования.

Полученная зависимость может быть использована как инструмент решения двух задач:

1) на этапе проектирования систем КУТП – как инструмент их технико-экономического обоснования;

2) на этапе функционирования систем КУТП – как индикатор оценки их эффективности, позволяющий избежать применения неверного управляющего воздействия вследствие недооценки точности исходных данных; данный инструмент позволяет рассчитать текущую точность КМК и оценить ее пригодность для корректного управления транспортным потоком в текущей ситуации.

Для систем КУТП, как и для других систем информирования участников дорожного движения, точность функционирования напрямую связана с доверием пользователей к системе, которое, в свою очередь, непосредственно влияет на эффективность функционирования систем КУТП. Теоретически при повышении точности систем КУТП на

30% по сравнению с текущим уровнем можно добиться почти трехкратного прироста эффективности функционирования, хотя прирост эффективности зависит от множества факторов и сугубо индивидуален для каждого участка УДС.

Чтобы полноценно применять разработанную модель, необходимо определить величину минимальной допустимой точности КМК, при которой функционирование систем КУТП будет эффективным и не будет оказывать негативного влияния на дорожное движение. Описание эксперимента по определению этой величины и полученные результаты будут изложены в следующей статье. ■

Литература

1. Жанказиев С.В. Методологические принципы построения телематической системы косвенного управления транспортными потоками // Вестн. Моск. автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та (МАДИ). 2010. № 3. С. 48–54.
2. Жанказиев С.В., Воробьев А.И. Определение оптимального расстояния от разветвления улично-дорожной сети до установки информационных объектов телематической системы маршрутного ориентирования // Вестн. Моск. автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та (МАДИ). 2010. № 2. С. 107–114.
3. Воробьев А.И. Формирование методики оптимизации телематического комплекса технических средств интеллектуальной системы маршрутного ориентирования: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 193 с.
4. Тур А.А. Разработка методики обоснования технического и телематического обеспечения динамических информационных табло как комплексного средства организации дорожного движения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 199 с.
5. ГОСТ Р 56350-2015 Интеллектуальные транспортные системы. Косвенное управление транспортными потоками. Требования к динамическим информационным табло; введ. 12 февраля 2015 г. М.: Стандартинформ, 2015. 29 с.
6. Морозов Д.Ю. Проектирование систем косвенного управления транспортными потоками на основе качественных матриц корреспонденции // Вестн. Москов. автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та (МАДИ). 2012. № 4. С. 62–65.