

Методы оценки эффективности систем радиочастотной идентификации транспортных средств*

В. М. Вишнеvский¹, А. А. Ларионов¹, Е. А. Михайлов^{1,III}, И. А. Федотов¹, В. Л. Абрамян¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

"Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова" РАН, г. Москва, Россия

^{II} Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования

"Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова", г. Москва, Россия

^{III} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

"Физический институт им. П.Н. Лебедева" РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. В работе представлена аналитическая модель для оценки эффективности работы перспективной системы фиксации нарушений правил дорожного движения, использующей RFID-метки, встроенные в государственные номерные знаки транспортных средств. Исследуемая система проходила тестирование на автомобильных дорогах Республики Татарстан и ЦКАД в Московской области, а в настоящее время в пилотном режиме планируется внедрение системы в нескольких субъектах Российской Федерации. Такая система позволяет существенно повысить вероятность идентификации нарушителей, по сравнению с существующими системами видеофиксации. Для оценки эффективности идентификации транспортного средства при различных условиях разработана как вероятностная модель, так и методы имитационного моделирования. Численные результаты показывают, что предложенная аналитическая модель позволяет получить результаты с ошибкой не более 5 % и значительно быстрее, чем имитационная модель.

Ключевые слова: RFID-технологии, комплексы видеофиксации, имитационное моделирование, идентификация.

DOI 10.14357/20718632230106

Введение

Высокая аварийность на автомобильных дорогах является одной из серьезных проблем как в Российской Федерации, так и во многих других государствах. Ежегодно в дорожно-транспортных происшествиях гибнут десятки тысяч водителей и наносится огромный материальный ущерб [1]. Большинство из этих случаев, так или иначе, связаны с различными нарушениями правил дорожного движения (ПДД), такими как выезд на полосу встречного

движения, превышение допустимой скорости, проезд на запрещающий сигнал светофора и т.д. Одним из наиболее эффективных способов борьбы с подобными нарушениями является установка комплексов видеофиксации нарушений ПДД. Они позволяют обеспечивать непрерывный сплошной контроль за всеми автомобилями, проезжающими по определенному участку дороги.

Использование комплексов видеофиксации привело к двукратному снижению смертности на дорогах России за десятилетний период

* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-49-02023.

с момента начала их массового внедрения на автодорогах. Также постепенно сокращается общее количество дорожно-транспортных происшествий (ДТП), несмотря на рост количества автомобилей.

Следует, однако, отметить, что эффективность работы таких систем могут препятствовать загрязнение номерных знаков при плохой погоде или намеренное скрытие номерного знака. По этим причинам эффективность существующих систем идентификации автомобилей может падать ниже 50% [2]. Это определяет актуальность исследования и реализации новых систем безопасности на автодорогах, использующих альтернативные методы идентификации транспортных средств, в частности, технологию радиочастотной идентификации (RFID).

Первые идеи RFID-технологии, лежащие в основе методов радиочастотной идентификации, были сформулированы Л. С. Терменом в 1945 году [3]. Принципы технологии заключались в том, что пассивное устройство активировалось при попадании на него электромагнитной волны. Отражая волну, устройство формировало ответ. Подобные подходы использовались в различных устройствах связанных как с гражданскими технологиями, так и с разведывательной техникой времен Холодной войны. Несмотря на очевидные перспективы подобных подходов, первый патент был зарегистрирован только в 1983 году Чарльзом Уолтоном. В настоящий момент RFID-технологии применяются для инвентаризации на складах, борьбы с воровством в супермаркетах. Одно из первых применений RFID-меток на дороге относится к 1990-м годам, когда было предложено использовать эту технологию для оплаты проезда по платным дорогам в США [4]. В настоящий момент RFID-метки широко используются для оплаты парковки, фиксации въезда на территории с ограниченным доступом. Подобные технологии применяются не только для идентификации транспортных средств, но и, например, для распознавания дорожных знаков. Также данные технологии используются при создании проектов умного города, которые могут оптимизировать автомобильные потоки, составлять расписание общественного транспорта и т.д. [5-6].

В настоящей работе изучается вопрос о применении RFID-меток в комплексе для фиксации нарушений ПДД. В государственный регистрационный знак встраивается радиометка, которая имеет возможность обмениваться информацией со считывателем. Метка содержит уникальный идентификатор, а также может хранить в памяти основную информацию об автомобиле, его владельце и т.д. В том случае, если транспортное средство движется с нарушением правил дорожного движения, то при проезде мимо комплекса фиксации информация о владельце передается в базу данных ГИБДД, после чего ему выписывается постановление и налагается штраф.

Подобные комплексы были впервые в России испытаны в тестовом режиме в республике Татарстан. Номерные знаки с RFID-метками использовались на транспортных средствах ряда организаций, и в экспериментальном режиме проводилось тестирование комплекса, работающего в соответствии с технологией, описанной выше. Было показано, что вероятность идентификации транспортных средств составила выше 90%, что значительно превышает результаты действующих систем видеofиксации нарушений [7-8]. В настоящее время принято решение о более масштабной пилотной реализации подобных комплексов на территории трех субъектов Российской Федерации – Москвы, Санкт-Петербурга и Республики Татарстан.

В связи с этим актуальной задачей является теоретическая оценка эффективности работы подобных систем, позволяющая определить вероятность успешной идентификации номерного знака в зависимости от скорости движения автомобиля и других внешних условий.

В настоящей работе была рассмотрена модель с непостоянной битовой ошибкой, которая позволяет построить асимптотические оценки вероятности идентификации транспортного средства. Оценки, полученные с помощью предложенной аналитической модели, сравниваются с данными, полученными в результате имитационного моделирования системы, учитывающего протокол передачи данных между считывателем и меткой и многолучевое распространение радиосигналов. Показано, что при определенных условиях точность аналити-

ческой модели оказывается достаточно близкой к имитационной, требуя при этом значительно меньшего времени для получения результата.

Принцип работы системы радиочастотной идентификации ТС

Комплекс радиочастотной идентификации транспортных средств состоит из RFID-считывателя, который располагается над автодорогой, и RFID-метки, размещённой на номере автомобиля. Схема комплекса приведена на Рис. 1.

Область чтения L – граница расстояния, на котором считыватель способен распознать метку. Для меток пассивного типа она составляет примерно 10 метров.

RFID-считыватель – устройство, основная задача которого идентифицировать или записывать информацию на метки. RFID-метка – устройство, которое содержит в себе уникальный идентификатор и передает его считывателю. Метки бывают пассивными и активными, в нашей задаче рассматриваются пассивные метки (Рис. 2). Взаимодействие считывателя и меток осуществляется согласно стандарту EPC Class 1 Gen. 2 (ISO 18000-6C) [9].

Для передачи команд считыватель использует схему кодирования PIE (Pulse Interval Encoding). Согласно этой схеме, символы нуля и единицы имеют разную длительность (единица в 1,5 – 2 раза длиннее нуля). Длительность нуля стандарт обозначает как $Tari$, она может составлять 6,25, 12,5, 18,75 или 25 мкс. В ответах

метки используется код FMO (один символ на бит), или код Миллера с 2, 4 или 8 символами на бит. Выбор способа кодирования ответов осуществляет считыватель в начале опроса.

Помимо способа кодирования ответов, длительность передачи данных от метки определяется типом преамбулы (она может быть обычной или расширенной) и скоростью. Символьная скорость, BLF (*Backscatter Link Frequency*) вычисляется как $\frac{DR}{TRcal}$, где DR – константа, (возможные значения: 8 и 64/3), а $TRcal$ – символ из преамбулы команды Query, длительность которого находится в интервале от 2,75 до 9 $Tari$. Все параметры выбираются считывателем в начале опроса и в дальнейшем не меняются. Если M – число символов на бит в ответах метки, то битовая скорость передачи ответов можно вычислить как

$$\frac{DR}{M \times TRcal}$$

Протокол обмена данными между считывателем и меткой основан на слотированном протоколе ALOHA. Опрос производится в раундах, которые разбиты на слоты. Метки выбирают случайные слоты для передачи ответов. Меняя число слотов, считыватель может снижать вероятность коллизии, возникающей, если несколько меток выбирают один и тот же слот. Более подробно процесс обмена командами и ответами будет рассмотрен далее, при построении модели расчета длительности раунда.

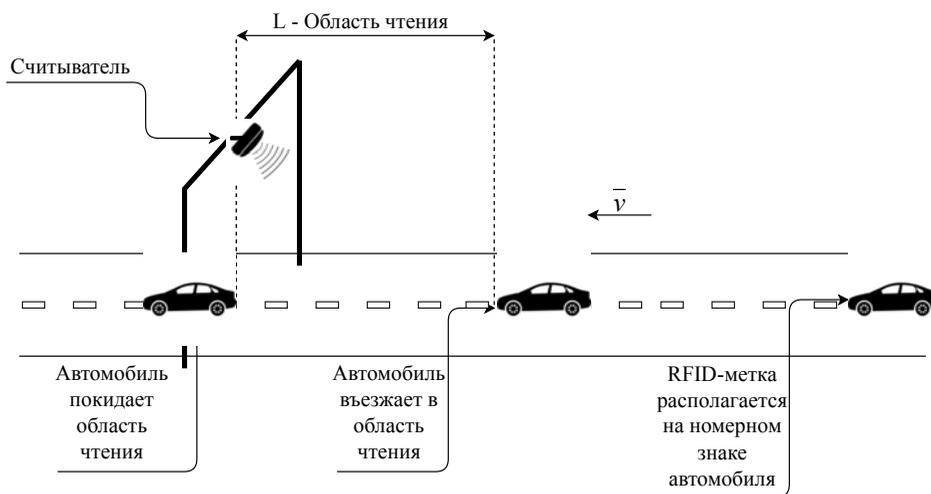


Рис. 1. Схема комплекса радиочастотной идентификации

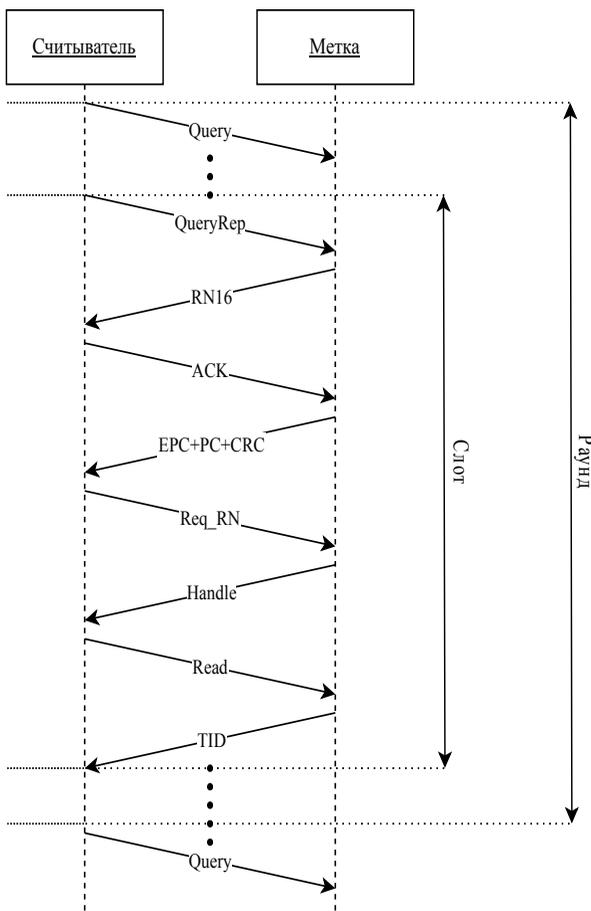


Рис. 2. Схема обмена сообщениями между считывателем и меткой

Многолучевая модель распространения сигналов

Вероятность битовой ошибки (BER) будем обозначать как p_e . Ее величина зависит от таких факторов, как способ кодирования сигнала и среднее значение отношения «сигнал-шум» на считывателе. В данной работе считается, что сообщения от считывателя доходят до метки без ошибок, а от метки к считывателю ответы могут содержать ошибки.

В работе [10] показан способ оценки битовой ошибки для подобной RFID-системы. При расчете вероятности битовой ошибки в первую очередь следует произвести вычисление мощности принятого меткой сигнала считывателя. В случае получения результата выше, чем пороговая чувствительность метки, требуется произвести расчет мощности принятого считывателем (отраженного меткой) сигнала.

После этого можно оценить BER с использованием модели радиоканала с аддитивным гауссовским шумом, применяя полученное значение мощности сигнала.

Рассчитать мощность принятого меткой и считывателем сигналов $P_r^{(t)}$ и $P_r^{(r)}$ соответственно, и затухание A_{pl} можно с помощью формул для расчета бюджета соединений и формулы многолучевого распространения [11]:

$$P_r^{(t)} = P_t^{(r)} G^{(r)} A_{pl} A_{pol} G^{(t)}$$

$$P_r^{(r)} = P_r^{(t)} G^{(t)} A_{bs} A_{pl} A_{pol} G^{(r)} \tag{1}$$

$$A_{pl} = |r(t)|^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \sum_{i=0}^N \frac{R_i \Gamma_i}{d_i} e^{-jk(d_i - vt \cos \psi_i)} \right|^2,$$

где $P_t^{(r)}$ - мощность передачи считывателем, $G^{(r)}$, $G^{(t)}$ - усиление антенн считывателя и метки соответственно, A_{pol} - потери на поляризации, A_{bs} - потери на модуляции отраженного сигнала, λ - длина волны, R_i - коэффициент затухания, вызванного отражением i -го луча (для основной LoS-компоненты $R_0 = 1$). Применение формулы A_{pl} для расчета затухания обосновано тем, что в системе, кроме основного луча, также имеются и отражения от дороги, конструкций на обочине или разделительной полосе, стен тоннелей, других автомобилей. В настоящей работе будем рассматривать двухлучевую модель, в которой учитывается только отражение от дороги. Выбор этой модели обусловлен тем, что отраженный от дороги луч присутствует всегда, в то время как прочие отражения зависят от конкретных условий эксплуатации системы.

Коэффициент отражения R выражается так:

$$R = \frac{\sin \Phi - \sqrt{C}}{\sin \Phi + \sqrt{C}},$$

где ϕ - угол падения, $C = \eta - \cos^2 \phi$ для компоненты, которая поляризована горизонтально, $(\frac{\eta - \cos^2 \phi}{\eta^2})$ для компоненты, которая

поляризована вертикально. Значение $\eta = \epsilon_r(f) - j60\lambda\sigma$, где $\epsilon_r(f)$ – относительная диэлектрическая проницаемость поверхности для заданной частоты f (диапазон частоты для дороги может меняться от 3 до 70) а $\sigma(f)$ – проводимость (изменяется от 0.00014 См/м для сухой земли до 5 См/м для морской воды)

Учитывая возможное наличие дополнительных отражений, вероятность битовой ошибки будет рассчитываться по следующей формуле [12]:

$$P_e = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{1+2/(M\tilde{\gamma})}} + \frac{2}{\pi} \frac{\arctan \sqrt{1+2/(M\tilde{\gamma})}}{\sqrt{1+2/(M\tilde{\gamma})}}, \quad (2)$$

где $\tilde{\gamma}$ - отношение уровня сигнала к уровню шума (SINR).

На Рис. 3 представлен график вероятности битовой ошибки при разных способах кодирования. Здесь и далее для краткости будем обозначать $Tari$ как δ .

Ключевое допущение, предлагаемое в данной статье, состоит в следующем. Так как расчет BER с помощью описанной модели очень трудоемкий и его тяжело использовать в аналитических моделях, предлагается аппроксимировать BER с помощью двух парабол:

$$\beta(x) = \begin{cases} a_1 + b_1(x - x_1)^2, & x < L_0 \\ a_2 + b_2(x - x_2)^2, & x > L_0 \end{cases}, \quad (3)$$

где $a_1, a_2, b_1, b_2, x_1, x_2$ и $L_0\sqrt{b^2 - 4ac}$ - коэффициенты (Рис. 4 и 5) парабол.

Свободными коэффициентами функции $P_r^{(t)}$ являются только $a_1, a_2, b_1, b_2, x_1, x_2$. Значение L_0 - точка пересечения парабол, то есть решение квадратного уравнения:

$$a_1 + b_1(L_0 - x_1)^2 = a_2 + b_2(L_0 - x_2)^2,$$

которое лежит между минимумами парабол, то есть $L_0 \in (x_1, x_2)$.

Для определения свободных параметров $a_1, a_2, b_1, b_2, x_1, x_2$ можно использовать метод наименьших квадратов. При этом необходимо

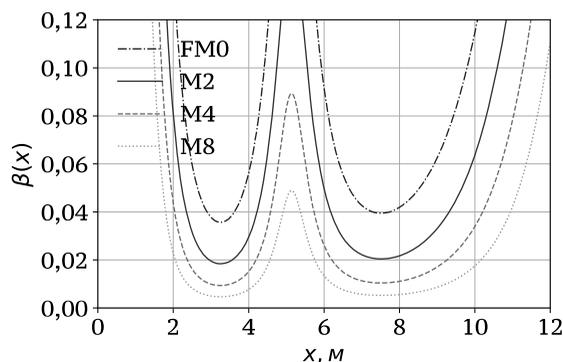


Рис. 3. Распределение битовой ошибки при $\delta = 6,25$ мс
штрихпунктирная линия – кодировка FM0, сплошная линия - M2, пунктирная линия – M4, штриховая линия – M8

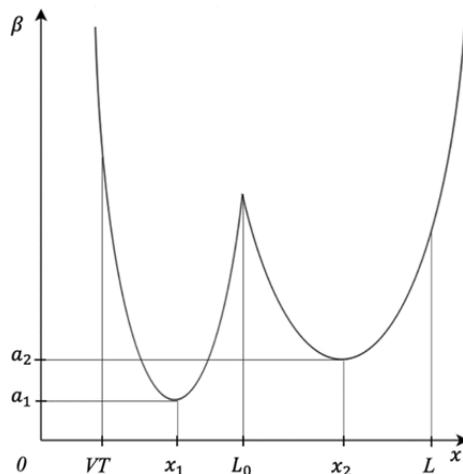


Рис. 4. Аппроксимация $\beta(x)$

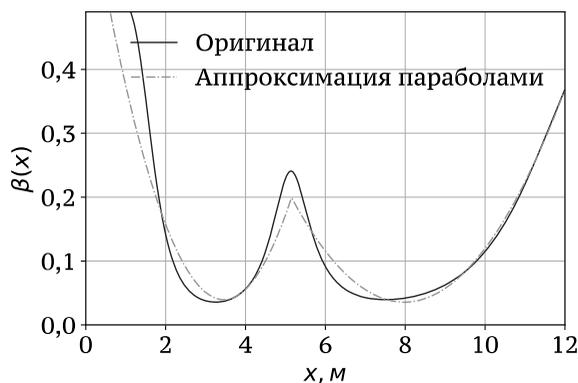


Рис. 5 Сравнение расчетной функции BER и аппроксимации параболой

гарантировать, что аппроксимация будет корректной, то есть область значений аппроксимирующей функции $\beta(x)$ в области определения от 0 до L должна быть такой же, как и у аппроксимируемой функции p_e . Вероятность битовой ошибки BER при любых значениях M , $Tari$ и прочих параметрах всегда находится в интервале $0 < BER \leq 0,5$, в то время как при некоторых значениях искомым коэффициентов значение аппроксимирующей функции $\beta(x)$ может становиться нулевым, отрицательным или сколь угодно большим. Отметим, что если аппроксимирующая функция $\beta(x)$ будет даже на небольшом интервале принимать значения существенно меньшие минимумов p_e (BER), результат вычисления вероятности идентификации метки, который будет описан далее, будет слишком оптимистичен. Это происходит из-за того, что для успешной идентификации метку достаточно прочесть один раз, а наличие даже малой области с нулевым BER (чего не бывает на практике) гарантирует такое прочтение. Поэтому важно сформулировать ограничения на возможные значения параметров парабол в $\beta(x)$ так, чтобы их минимумы не отличались от минимумов BER более, чем на некоторое ε . Функция p_e имеет два минимума (Рис. 3). Обозначим их как \hat{m}_1 и \hat{m}_2 , а координаты x , в которых функция p_e их принимает, как \hat{x}_1 и \hat{x}_2 , то есть $p_e(\hat{x}_i) = \hat{m}_i, i = 1, 2$.

С учетом всего вышесказанного, поиск значений коэффициентов $a_1, a_2, b_1, b_2, x_1, x_2$ велся методом наименьших квадратов с ограничениями на область существования коэффициентов, т.е.:

$$\min \int_0^L (p_e(\tilde{\gamma}(x)) - \beta(x))^2 dx$$

при ограничениях

$$\begin{cases} |a_i - \hat{m}_i| \leq \varepsilon \\ |x_i - \hat{x}_i| \leq \varepsilon \end{cases}, \quad i = 1, 2.$$

В нашей работе мы полагали $\varepsilon = 0,1$, то есть допускали отклонение в пределах 10 %.

Аналитический расчет вероятности идентификации метки

Разделим раунд инвентаризации на 4 этапа. Каждый этап будет содержать по одному ответу от метки. Определим время, которое может быть затрачено на каждый из этапов. Оно состоит из величины, пропорциональной длине сообщения, равной Q , и некоторой дополнительной составляющей τ . Таким образом, время, затраченное на каждый этап, выражается как время до поглощения в полумарковском процессе (Рис. 6).

На Рис. 6 показана вероятностная схема переходов между этапами в случае успешной или неуспешной передачи сообщения. Для краткости обозначим вероятности переходов как P_1, P_2 и P_3 , которые обозначают соответственно этапы передачи RN16, EPCID и Handle.

EPCID и TID – это сообщения от метки к считывателю, в которых содержатся идентификаторы метки. RN16 и Handle нужны для синхронизации метки и считывателя: метка проверяет работоспособность соединения, сравнивая переданное случайное машинное слово с тем, которое вернул считыватель в следующей команде (ACK для RN16 и Read для Handle). Размеры ответов метки приведены в Табл. 1

Вероятность успешной передачи сообщения определяется, как:

$$P_i = (1 - P_e)^{Q_i}.$$

Вероятность битовой ошибки определяется функцией $p_e(x) = p_e(\tilde{\gamma}(x))$, где $\tilde{\gamma}(x)$ – отношение сигнал-шум в заданной точке x . Как было показано в предыдущем разделе, вероятность битовой ошибки будем аппроксимировать функцией $\beta(x) \approx p_e(x)$ – формула (3).

Учитывая малость $\beta(x)$, можно приближенно записать выражение для P_i , как:

$$P_i = (1 - \beta(x))^{Q_i} \approx e^{-\beta(x)Q_i}. \quad (4)$$

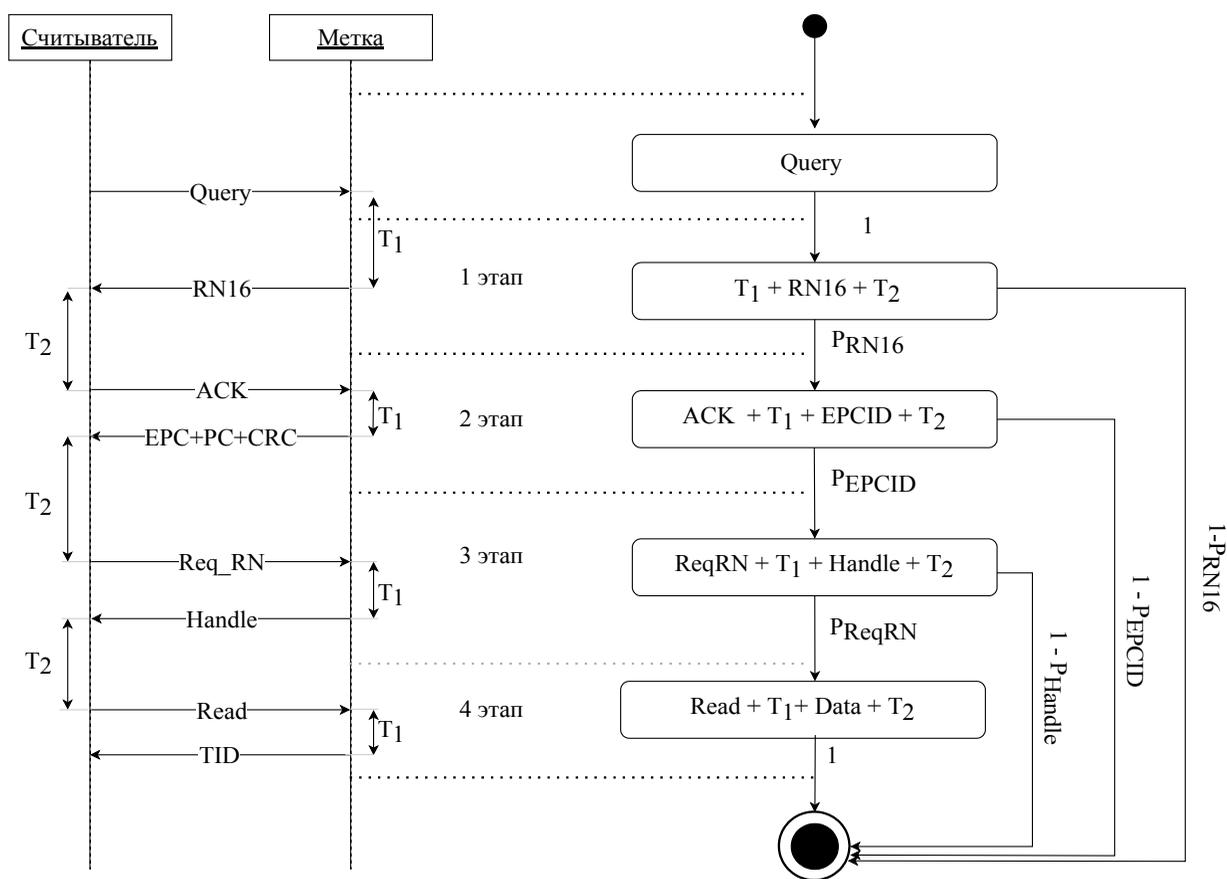


Рис. 6. Схема обмена сообщениями между считывателем и меткой и вероятности переходов между этапами случайного процесса

T_1 – время от окончания последнего символа команды до начала передачи первого бита преамбулы ответа метки, T_2 – время от окончания приема ответа метки до начала передачи команды

Табл. 1. Размеры ответов метки

I, номер этапа	Сообщение	Длина сообщения Q_i , бит
1	RN16	16
2	EPCID	128
3	Handle	32
4	TID	97

Для того, чтобы определить вероятность успешной идентификации метки, нужно рассчитать число раундов, в которых она успевает принять участие за время проезда участка $T_L = L/V$. Для этого определим среднюю длительность τ одного раунда, используя случайный процесс, показанный справа на Рис. 6. Каждый из этапов, показанных на рисунке, может включать передачу команды C_i , ожидание начала передачи ответа T_1 , передачу ответа R_i и его

ожидание T_2 . Ответ метки R_i состоит из Q_i бит (Табл. 1), преамбулы длиной Q_p , равной 6, 10, 18 или 22 бит (зависит от способа кодирования ответов) и одного завершающего бита, которые передаются со скоростью $DR/(M \times TRcal)$, то есть общее время передачи составляет $(M \times TRcal \times (Q_p + Q_i + 1))/DR$. Номинальная длительность интервала T_1 составляет

$\max(RTcal, 10T_{pri})$, где $T_{pri} = TRcal/DR$, а длительность интервала T_2 выбирается в интервале от $3T_{pri}$ до $20T_{pri}$. Команда C_i состоит из преамбулы, которая включает символы $Tari$, $RTcal$, $TRcal$ (для Query) и разделитель длиной 12,5 мкс, и сообщения, кодируемого символами нуля ($Tari$) и единицы. Символ $RTcal$ имеет длительность, равную сумме длительностей нуля и единицы, она составляет от 2,5 до 3 $Tari$. Символ $TRcal$ определяется так, что $1,1RTcal \leq TRcal \leq 3RTcal$.

Будем считать, что длительности символов $RTcal$ и $TRcal$ фиксированы и не изменяются. Тогда их можно выразить как $RTcal = k_1 \times Tari$, $k_1 \in [2.5, 3]$, $TRcal = k_2 \times RTcal$, $k_2 = [1.1, 3]$ и, соответственно, $TRcal = k_1 k_2 \times Tari$ и $data - 1 = (k_1 - 1) \times Tari$. Также зафиксируем $T_2 = k_3 T_{pri}$. Обозначая, как и ранее, длительность $Tari$ как δ , получаем следующие выражения для сообщений и интервалов, входящих в состав одного этапа. Длительность команды C_i , состоящей из x_0 нулей и x_1 единиц:

$$\begin{aligned} 12,5\text{мкс} + Tari + RTcal + x_0(data - 0) + x_1(data - 1) = \\ 12,5\text{мкс} + \delta + k_1\delta + x_0\delta + x_1(k_1 - 1)\delta = \\ 12,5\text{мкс} + (k_1 + x_0 + x_1(k_1 - 1))\delta \approx \\ (k_1 + x_0 + x_1(k_1 - 1) + 1)\delta \end{aligned}$$

Последний переход обусловлен тем, что длительность $Tari$ составляет 6,25, 12,5, 18,75 или 25 мкс. Длительность $T_{pri} = TRcal/DR = k_1 k_2 \delta / DR$, откуда получаем зависимости интервалов T_1 и T_2 :

$$\begin{aligned} T_1 &= \max(k_1\delta, (10k_1 k_2 / DR)\delta) = \\ &= \delta \times \max(k_1, 10k_1 k_2 / DR) \\ T_2 &= \delta k_1 k_2 k_3 / DR \end{aligned}$$

Наконец, длительность передачи ответа метки длиной Q_i бит определяется как:

$$\begin{aligned} M \times TRcal \times (Q_p + Q_i + 1) / DR = \\ = M k_1 k_2 \delta (Q_p + Q_i + 1) / DR \end{aligned}$$

Таким образом, длительности команд (за исключением короткого разделителя), ответов

меток и интервалов T_1 и T_2 , а значит и этапов, оказываются пропорциональными интервалу $Tari$. Для каждого i -го этапа обозначим такой коэффициент пропорциональности как n_i , а через $N_i = n_0 + \dots + n_i$ обозначим коэффициент пропорциональности между длительностью $Tari$ и всеми этапами с нулевого (передачи Query) до i -го. Тогда математическое ожидание длительности одного раунда инвентаризации можно выразить, используя приближение (4), как:

$$\begin{aligned} \tau &= \delta(N_0 + (1 - P_1)N_1 + P_1(1 - P_2)N_2 + \\ &+ P_1 P_2(1 - P_3)N_3 + P_1 P_2 P_3 N_4) \approx \\ &\approx \delta(N_0 + (1 - e^{-\beta(x)Q_1})N_1 + e^{-\beta(x)Q_1}(1 - e^{-\beta(x)Q_2})N_2 + \\ &+ e^{-\beta(x)(Q_1+Q_2)}(1 - e^{-\beta(x)Q_3})N_3 + e^{-\beta(x)(Q_1+Q_2+Q_3)}N_4). \end{aligned}$$

Для вычисления вероятности идентификации было бы удобно выразить τ проще, как если бы она выражала передачу одного этапа с ответом длиной \tilde{Q} бит и коэффициентом пропорциональности \tilde{N} , то есть:

$$\tilde{\tau} = \delta \tilde{N} e^{-\beta(x)\tilde{Q}}, \quad \tau \approx \tilde{\tau}.$$

Предположение о существовании такого приближенного представления основано на том, что наиболее существенный вклад в выражение для τ вносит последнее слагаемое, описывающее передачу EPCID. Для нахождения значений \tilde{N} и \tilde{Q} воспользуемся методом наименьших квадратов:

$$\tilde{N}, \tilde{Q}: \min \int_0^{0,5} (\tau(\beta) - \tilde{\tau}(\beta))^2 d\beta$$

Результаты аппроксимации показаны на Рис. 7. Отметим, что использование аппроксимации (4) в аналитическом выражении для вычисления средней длины раунда дает очень малое отклонение от наиболее точной оценки, полученной с помощью имитационного моделирования системы.

Вероятность успешного завершения полного обмена сообщениями будет выражаться с помощью выражения:

$$P_M(x) = (1 - \beta(x))^Q,$$

где $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$. Учитывая малость $\beta(x)$, можно аппроксимировать $P_M(x)$ аналогично тому, как была аппроксимирована

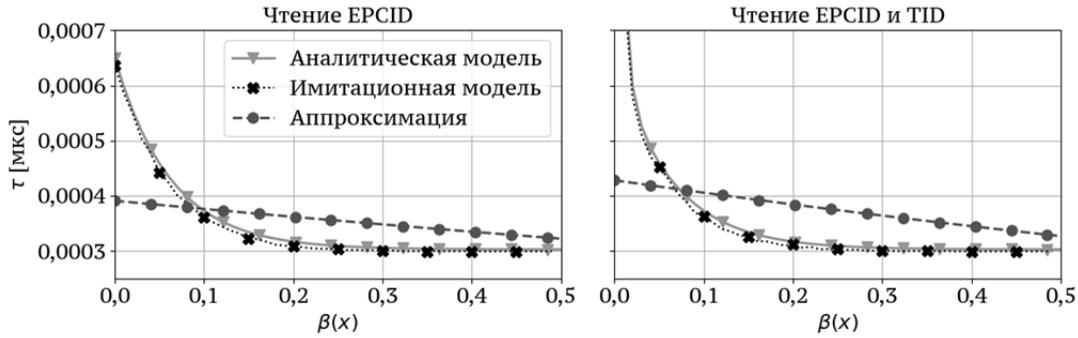


Рис.7. Сравнение расчетов средних длин раундов с помощью имитационной модели, аналитической модели и аппроксимации

вероятность $P_i(x)$ успешной передачи ответа на i -м этапе в выражении (4):

$$P_M(x) = e^{-\beta(x)Q} \quad (5)$$

При больших $\beta(x)$, которые составляют несколько десятых, можно сделать замену $\tilde{\beta}(x) = -\ln(1 - \beta(x))$, и результат останется таким же. Так как величина, $Q \approx 270$, можно сделать вывод, что $P_M(x) \ll 1$.

При большом количестве раундов инвентаризации на отрезке $(x, x + \Delta x)$ вероятность того, что метка не будет ни разу успешно идентифицирована, определяется как:

$$P_f(x, x + \Delta x) = (1 - P_M(x))^{\frac{\Delta x}{V\tau(x)}}$$

где V – скорость движения метки. Так как величина $P_M(x)$ достаточно мала, то последнее выражение можно переписать в виде:

$$P_f(x, x + \Delta x) \approx e^{-P_M(x) \frac{\Delta x}{V\tau(x)}}$$

Будем считать, что в начале раундов движущаяся метка находится в точках с координатами x_1, x_2, \dots, x_N . Тогда вероятность P_F того, что на всей области видимости считывателя метка ни разу не будет успешно идентифицирована, можно записать в виде произведения вероятностей $P_f(x_i, x_i + \Delta x)$:

$$P_F = e^{-P_M(x_1) \frac{\Delta x_1}{V\tau(x_1)}} e^{-P_M(x_2) \frac{\Delta x_2}{V\tau(x_2)}} \dots e^{-P_M(x_N) \frac{\Delta x_N}{V\tau(x_N)}}$$

которое, в свою очередь, можно переписать в виде интеграла:

$$P_F = e^{-\int_{VT}^L \frac{P_M(x)}{V\tau(x)} dx}$$

где T – время одного успешного раунда. Мы отступаем от нуля на расстояние VT , чтобы учесть, что, если раунд уже начался, когда метка только въехала в область чтения, она не сможет принять участие в опросе, а раунд с успешной передачей данных (например, от другой метки, которая покидает область чтения) имеет наибольшую длительность.

Зная вероятность того, что метка ни разу не была идентифицирована, можно вычислить вероятность того, что метка была идентифицирована хотя бы один раз (вероятность успешной идентификации):

$$\Pi = 1 - P_F = 1 - \exp\left(-\int_{VT}^L \frac{P_M(x)}{V\tau(x)} dx\right)$$

Подставив $P_M(x)$ из (5), получим следующую формулу:

$$\Pi = 1 - \exp\left(-\int_{VT}^L \exp(-\beta(x)Q) \frac{dx}{V\tau(x)}\right)$$

Данное выражение должно давать достаточно точный результат для оценки вероятности идентификации автомобиля. Вместе с тем, имеющиеся интегралы могут быть вычислены в общем случае лишь численно. Однако используя приближение (3) для BER интеграл в экспоненте можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} \int_{VT}^L \exp(-\beta(x)Q) \frac{dx}{V\tau(x)} &= \\ &= \frac{1}{V\tilde{N}\delta} \int_{VT}^L \exp(-\beta(x)(Q - \tilde{Q})) dx = \\ &= \frac{1}{V\tilde{N}\delta} \int_{VT}^{L_0} \exp(-(a_1 + b_1(x - x_1)^2)(Q - \tilde{Q})) dx + \\ &\quad + \int_{L_0}^L \exp(-(a_2 + b_2(x - x_2)^2)(Q - \tilde{Q})) dx. \end{aligned}$$

Для первого интеграла имеем:

$$\int_{VT}^{L_0} \exp(-(a_1 + b_1(x - x_1)^2)(Q - \tilde{Q})) dx = \frac{\sqrt{\pi} e^{-a_1(Q - \tilde{Q})}}{2\sqrt{b_1(Q - \tilde{Q})}} \left[\Phi\left((L_0 - x_1)\sqrt{a_1(Q - \tilde{Q})}\right) + \Phi\left((x_1 - VT)\sqrt{b_1(Q - \tilde{Q})}\right) \right]$$

Аналогичное вычисляется и второй интеграл:

$$\int_{L_0}^L \exp(-(a_2 + b_2(x - x_2)^2)(Q - \tilde{Q})) dx = \frac{\sqrt{\pi} e^{-a_2(Q - \tilde{Q})}}{2\sqrt{b_2(Q - \tilde{Q})}} \left[\Phi\left((L - x_2)\sqrt{b_2(Q - \tilde{Q})}\right) + \Phi\left((x_2 - L_0)\sqrt{b_2(Q - \tilde{Q})}\right) \right]$$

И наконец, можно записать итоговое выражение для вероятности идентификации метки:

$$\Pi = 1 - \exp \left(- \frac{1}{V\tilde{N}\delta} \left[\frac{\sqrt{\pi} e^{-a_1(Q - \tilde{Q})}}{2\sqrt{b_1(Q - \tilde{Q})}} \left[\Phi\left((L_0 - x_1)\sqrt{b_1(Q - \tilde{Q})}\right) + \Phi\left((x_1 - VT)\sqrt{b_1(Q - \tilde{Q})}\right) \right] - \frac{1}{V\tilde{N}\delta} \left[\frac{\sqrt{\pi} e^{-a_2(Q - \tilde{Q})}}{2\sqrt{b_2(Q - \tilde{Q})}} \left[\Phi\left((L - x_2)\sqrt{b_2(Q - \tilde{Q})}\right) + \Phi\left((x_2 - L_0)\sqrt{b_2(Q - \tilde{Q})}\right) \right] \right] \right] \right)$$

Сравнение результатов математического приближения и имитационного моделирования

Кроме теоретического приближения, описанного выше, данная задача решалась с помощью методов имитационного моделирования. Для этого была разработана имитационная модель на языке Python, которая моделирует проезд автомобилей с метками мимо RFID-считывателя, обмен сообщениями между считывателем и метками по стандарту EPC Class 1 Gen.2, рассчитывает мощности принятых сигналов и BER по формулам (1) и (2). Имитационная модель также позволяет учесть возникновение коллизий, когда в одном слоте приходят ответы от двух и более меток. Модель позволила проана-

лизировать процесс идентификации транспортных средств, движущихся с различной скоростью, используя усреднение по выборкам достаточно большого объема. На Рис. 8 представлены результаты сравнения математических оценок и имитационного моделирования.

Следует отметить, что аналитическая модель позволяет рассчитать вероятность идентификации в 100 раз быстрее, чем имитационная модель. Расхождение результатов при маленьких скоростях происходит из-за того, что в имитационной модели учитываются коллизии. Область считывания равна примерно 12 метрам, метки въезжают в область с интервалом 1 секунду. Если скорость движения метки меньше 12 м/с, то в области чтения будет более одной метки. Из-за того, что в моделируемой системе предполага-

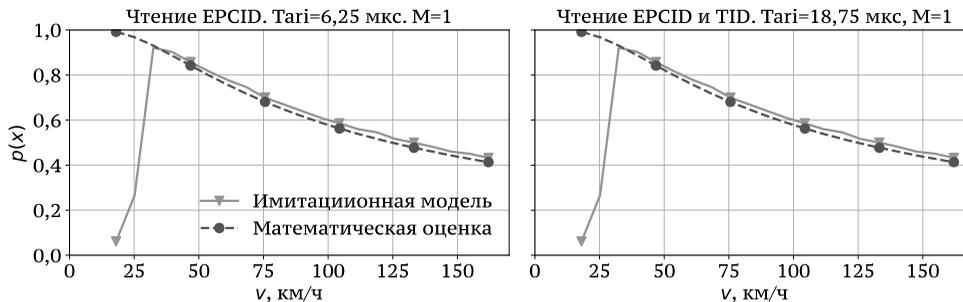


Рис.8. Сравнение результатов имитационного моделирования (пунктирная линия) и математического приближения (сплошная линия)

лось, что в раунде только один слот ($Q = 0$), то при нахождении в области чтения более одной метки коллизия происходила с вероятностью единица. В дальнейшем предполагается расширить математическую модель, чтобы иметь возможность учесть произвольную длину раунда и корректно учесть вероятности коллизий.

Заключение

В статье была представлена аналитическая модель, которая позволяет получить достаточно точную оценку вероятности идентификации метки, расположенной на номерном знаке. Для валидации предложенной аналитической модели была разработана имитационная модель, имитирующая проезд автомобиля, обмен сообщениями и распространение радиосигналов. Результаты обеих моделей хорошо согласуются между собой. Аналитическая модель построена на аппроксимации распределения функции зависимости битовой ошибки от координаты двумя параболой. Между результатами моделей при малых скоростях движения есть систематическое расхождение, которое объясняется тем, что в аналитической модели не учитываются коллизии между ответами меток. При больших скоростях движения аналитическая модель дает результат, отклоняющийся не более, чем на 5 % от результатов имитационной модели.

Литература

1. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2020 год. Информационно-аналитический обзор. – М.: ФКУ «НЦБДД МВД России», 2021, 79 с.

Вишневецкий Владимир Миронович. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Заведующий лабораторией, доктор технических наук, профессор. Количество печатных работ: 212 (в т.ч. 9 монографий). Область научных интересов: исследование беспроводных сетей связи, теория массового обслуживания. E-mail: vishn@inbox.ru

Ларионов Андрей Алексеевич. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Старший научный сотрудник, кандидат технических наук. Количество печатных работ: 60. Область научных интересов: исследование беспроводных сетей связи, теория массового обслуживания. E-mail: larioandr@gmail.com

Михайлов Евгений Александрович. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук. Количество печатных работ: 144 (в т.ч. 1 монография). Область научных интересов: математическое моделирование. E-mail: ea.mikhajlov@physics.msu.ru

Федотов Иван Анатольевич. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Младший научный сотрудник. Количество печатных работ: 9. Область научных интересов: радиочастотная идентификация, математическое моделирование. E-mail: fedotov.ia15@physics.msu.ru

Абрамян Вильмен Левонович. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Инженер. Количество печатных работ: 5. Область научных интересов: радиочастотная идентификация, математическое моделирование, БПЛА. E-mail: abramian.vl@phystech.edu

2. Вишневецкий В.М., Минниханов Р.Н. Автоматизированная система контроля нарушений правил дорожного движения с использованием RFID-технологий и новейших беспроводных средств // Проблемы информатики. 2012. №1. С. 52-65.
3. P. Nikitin, "Leon Theremin (Lev Termen)", IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.54, no.5, pp.252–257, 2012.
4. Landt J. The history of RFID // IEEE Potentials. — 2005. — oct. — Vol. 24, no. 4. —Pp. 8–11.
5. D. M. Dobkin, The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice. Elsevier Inc, 2008.
6. Dynamic RFID Identification in Urban Traffic Management Systems / Bartosz Pawlowicz, Bartosz Trybus, Mateusz Salach, Piotr Jankowski-Mihulowicz // Sensors. — 2020. — jul. — Vol. 20, no. 15. — P. 4225
7. Вишневецкий В.М., Минниханов Р.Н., Дудин А.Н., Клименок В.И., Ларионов А.А. Новое поколение систем безопасности на автодорогах и их применение в интеллектуальных транспортных системах. // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 4. С. 80-89.
8. Вишневецкий В.М., Ларионов А.А., Целикин Ю.В., Иванов Р.Е., Козырев Д.В. Опыт реализации системы безопасности на автодорогах с использованием радиочастотной идентификации UHF-диапазона /Proceedings of the 20th International Conference, Distributed Computer and Communication Networks (DCCN 2017, Moscow, Russia). М.: ТехноСфера, 2017. С. 152-163.
9. EPC Radio-Frequency Identify Protocols. Class-1 Generation-2 UHF RFID. Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz. Version 2.0.1. EPCGlobal Inc., 2015.
10. A. A. Larionov, R. E. Ivanov and V. M. Vishnevsky, "UHF RFID in Automatic Vehicle Identification: Analysis and Simulation" IEEE Journal of Radio Frequency Identification, vol. 1, no. 1, pp. 3-12, March 2017, doi: 10.1109/JRFID.2017.2751592
11. P. V. Nikitin and K. V. S. Rao, "Performance limitations of passive UHF RFID systems", IEEE Antennas and Propagation Symposium, pp. 1011-1014, 2006
12. Effects of interferences in UHF RFID systems / A. Lazaro, D. Girbau, R. Vilarino // Progress In Electromagnetics Research. — 2009. — Т. 98. — С. 425—443.

Evaluation of the Effectiveness of Functional Systems of Radio Frequency Identification of Vehicles

V. M. Vishnevsky¹, A. A. Larionov¹, E. A. Mikhailov^{1,III}, I. A. Fedotov¹, V. L. Abramian¹

¹V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{II} Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^{III} P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. This paper evaluates the performance of a promising system for recording violations of traffic rules using RFID tags embedded in state license plates of vehicles. This system was tested on the roads of the Republic of Tatarstan and the Central Ring Road in the Moscow Region, and at present it is planned to introduce the system in pilot mode in several regions of the Russian Federation. To assess the probability of identifying a vehicle under various conditions, both a probabilistic model and simulation methods have been developed. It is shown that, in comparison with the "classical" identification methods currently used, this approach allows achieving higher work efficiency and minimizing possible errors in the identification of the offending vehicle.

Keywords: RFID technologies, video recording complexes, simulation modeling, identification.

DOI 10.14357/20718632230106

References

1. Dorozhno-transportnaya avariynost' v Rossiyskoy Federatsii za 2020 god [Road traffic accidents in the Russian Federation for 2020]. 2021. Informatsionno-analiticheskiy obzor [Information and analytical review], FKU "NTSBDD MVD Rossii" ["Scientific Center for Road Safety of the Ministry of Internal Affairs of Russia], 79 p.
2. V.M. Vishnevsky, R.N. Minnikhanov. 2012. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya narusheniy pravil dorozhnogo dvizheniya s ispol'zovaniyem RFID-tekhnologiy i noveyshikh besprovodnykh sredstv [Automated system for monitoring violations of traffic rules using RFID technologies and the latest wireless devices]. Problemy informatiki [Problems of Informatics]. No. 1. Pp. 52-65.
3. P. Nikitin. 2012. Leon Theremin (Lev Termen). IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.54, no.5, pp.252-257.
4. Landt J. 2005. The history of RFID. IEEE Potentials. — oct. — Vol. 24, no. 4. —Pp. 8-11.
5. D. M. Dobkin. 2008. The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice. Elsevier Inc.
6. Bartosz Pawlowicz, Bartosz Trybus, Mateusz Salach, Piotr Jankowski-Mihulowicz. 2020. Dynamic RFID Identification in Urban Traffic Management Systems. Sensors. — jul. — Vol. 20, no. 15. — P. 4225.
7. V.M. Vishnevsky, R.N. Minnikhanov, A.N. Dudin, V.I. Klimenok, A.A. Larionov. 2013. Novoye pokoleniye sistem bezopasnosti na avtodorogakh i ikh primeneniye v intellektual'nykh transportnykh sistemakh [A new generation of road safety systems and their application in intelligent transport systems]. Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy [Information technologies and computing systems]. No. 4. Pp. 80-89.
8. V.M. Vishnevsky, A.A. Larionov, Y.V. Tselikin, R.E. Ivanov, D.V. Koz'yev. 2017. Opyt realizatsii sistemy bezopasnosti na avtodorogakh s ispol'zovaniyem radiochasotnoy iden-tifikatsii UHF-diapazona [Experience in implementing a road safety system using UHF radio frequency identification]. Proceedings of the 20th International Conference, Distributed Computer and Communication Networks (DCCN 2017, Moscow, Russia). Pp. 152-163.
9. EPC Radio-Frequency Identify Protocols. 2015. Class-1 Generation-2 UHF RFID. Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz. Version 2.0.1. EPCGlobal Inc.
10. A.A. Larionov, R.E. Ivanov and V.M. Vishnevsky. 2017. UHF RFID in Automatic Vehicle Identification: Analysis and Simulation. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, vol. 1, no. 1, pp. 3-12, doi: 10.1109/JRFID.2017.2751592.
11. P.V. Nikitin and K.V. S. Rao. 2006. Performance limitations of passive UHF RFID systems. IEEE Antennas and Propagation Symposium, pp. 1011-1014.
12. A. Lazaro, D. Girbau, R. Vilarino. 2009. Effects of interferences in UHF RFID systems // Progress In Electromagnetics Research. — Vol. 98. — Pp. 425-443.

Vishnevsky V. M. Doctor of Technical Sciences, Professor, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia, e-mail: vishn@inbox.ru

Larionov A. A. PhD, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia, e-mail: larioandr@gmail.com

Mikhailov E. A. PhD, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: ea.mikhajlov@physics.msu.ru

Fedotov I. A. V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia, e-mail: fedotov.ia15@physics.msu.ru

Abramian V. L. V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia, e-mail: abramian.vl@phystech.edu