

# ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НА ТРАНСПОРТЕ<sup>#</sup>

В. Л. Абрамян\*, В. М. Вишневский\*\*, А. А. Ларионов\*\*\*

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

\*✉ [abramian.vl@phystech.edu](mailto:abramian.vl@phystech.edu), \*\*✉ [vishn@inbox.ru](mailto:vishn@inbox.ru), \*\*\*✉ [larioandr@gmail.com](mailto:larioandr@gmail.com)

**Аннотация.** Технология RFID (Radio Frequency Identification) нашла широкое применение во многих областях науки и техники и повседневной жизни людей. Одним из интенсивно развивающихся направлений применения RFID является идентификация быстро движущихся транспортных объектов. Несмотря на большое количество научных статей, посвященных данной тематике, последние результаты в этой области нашли слабое отражение в существующих обзорах. Настоящая статья призвана восполнить этот пробел. Приведен обзор публикаций в области технологий и стандартов RFID, а также особенностей распространения сигналов в беспроводном канале связи между RFID-метками и считывателем. Дано описание теоретических и экспериментальных результатов, а также архитектуры и аппаратно-программных средств практической реализации систем идентификации наземных транспортных средств. Приведен также обзор публикаций о применении RFID на беспилотных летательных аппаратах.

**Ключевые слова:** радиочастотная идентификация, транспорт, беспилотный летательный аппарат, считыватель, метка.

## ВВЕДЕНИЕ

Технология радиочастотной идентификации (англ. *Radio Frequency Identification*, RFID) нашла широкое применение во многих областях науки и техники и повседневной жизни людей (в библиотеках, магазинах, при регистрации пассажиров в метро и автобусах и т. д.). С каждым годом количество приложений RFID растет, а вместе с этим увеличивается количество научных работ, в которых исследуются те или иные вопросы, касающиеся данной темы.

В обзоре [1] выделены следующие области применения RFID: транспорт, сельское хозяйство и животноводство, здравоохранение и социальное обеспечение, экологические приложения, а также защита и безопасность. Эти сферы могут быть расширены и уточнены применением радиочастотной идентификации в строительстве, транспортировке материалов и грузов при отслеживании и контроле

скорости спецтехники и организации ее парковки [2].

В качестве отдельной большой области применения RFID можно выделить логистику. Данному вопросу посвящены десятки статей, о чем можно судить по обзору [3]. Эффективное применение радиочастотной идентификации для определения местоположения объектов, навигации, а также маркировки и поиска различных объектов внутри помещений, где затруднено использование технологии GPS, описано в обзоре [4]. Маркировка осуществляется путем размещения на идентифицируемых объектах дешевых пассивных RFID-меток, содержащих информацию о своем точном местоположении. Часто такие системы применяются в качестве ассистента-помощника для слабовидящих людей в общественных пространствах, например в метро [4].

Одним из интенсивно развивающихся в последнее десятилетие направлений применения RFID является радиочастотная идентификация быстро движущихся транспортных средств (автомобили, поезда, беспилотные летательные аппараты). Однако в настоящее время теоретические и

<sup>#</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-00795.

практические исследования этого направления нашли слабое отражение в опубликованных в мировой литературе обзорах. Данная статья призвана восполнить этот пробел.

Структура статьи включает следующие разделы. В § 1 дано краткое описание технологий и стандартов RFID. Приводятся используемые в дальнейшем термины. В § 2 рассматриваются особенности распространения сигналов и оценка характеристик производительности беспроводной связи между RFID-меткой и считывателем. Приводится обзор работ, посвященных математическим методам проектирования радиоканала в RFID-системах. Обзору публикаций по применению RFID на наземном транспорте (автомобильных дорогах и железнодорожном транспорте) посвящен § 3. Дано описание теоретических и экспериментальных результатов, а также архитектуры и аппаратно-программных средств практической реализации систем идентификации наземных транспортных средств (ТС). Обзор публикаций по применению RFID на беспилотных летательных аппаратах рассмотрен в § 4.

## 1. СТАНДАРТЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Радиочастотная идентификация – технология маркировки и автоматической идентификации объектов, в которой посредством радиосигналов считываются или записываются данные, хранящиеся в RFID-метках (тегах). Простейшая RFID-система состоит как минимум из двух частей: собственно, меток – радиоэлектронных устройств, находящихся на идентифицируемом объекте, и считывателей – активных устройств, инициирующих процедуру обмена данными. Важной особенностью RFID-систем является то, что метки представляют собой, как правило, пассивные устройства, не имеющие встроенного источника питания и ожидающие инициации обмена данными со стороны считывателя. Благодаря этому метки становятся настолько дешевыми и простыми, что появляется возможность оснащать ими большинство бытовых товаров в розничных магазинах, например ярлыки одежды, обложки книг в библиотеках и т. д. Также RFID-система может содержать другие устройства для расширения своего функционала или являться частью большей системы. Например, данные, полученные считывателем, отправляются посредством других протоколов связи в удаленную базу данных.

Для увеличения числа задач, решаемых с помощью RFID, были созданы полупассивные и ак-

тивные метки. Полупассивные метки имеют свой источник энергии (литиевую или солнечную батарею), благодаря которым организуется электропитание встроенной микросхемы. Соответственно, они способны принимать и передавать сигналы на существенно большие расстояния по сравнению с пассивными метками. При этом полупассивные метки не могут генерировать собственный высокочастотный сигнал, инициируя тем самым сеанс связи. Они могут только модулировать поле считывателя так же, как это делают пассивные метки. Активные метки имеют другой принцип работы, так как они включают в себя активный передатчик, а иногда и приемник. Для передачи данных на считыватель они излучают высокочастотное электромагнитное поле вместо того, чтобы модулировать поле считывателя.

В RFID используются три основных диапазона передачи информации, для каждого из которых существуют свои стандарты:

– диапазон низких частот: 30–300 кГц (НЧ, англ. *low frequency*, LF) используется для ближней связи между меткой и считывателем на расстоянии до 1 см [5];

– диапазон высоких частот: 3–30 МГц (ВЧ, англ. *high frequency*, HF) используется для связи на расстоянии 0–1 м [6];

– диапазон сверхвысоких частот: 860 МГц – 960 МГц (СВЧ, англ. *ultra high frequency*, UHF) применяется для связи и идентификации на расстоянии более 1 м [7].

Технология радиочастотной идентификации начала широко применяться в различных областях с конца XX в. Помимо классического применения RFID для идентификации объектов в магазинах и складах, создания электронных карт доступа и т. д. данная технология может быть использована для позиционирования мобильных объектов [8–10] или для помощи в поиске потерявшихся в городе людей с ограниченными возможностями [11]. Подробнее о технологии RFID в целом можно прочитать в книге К. Финкенцеллера [12]. Далее в обзоре будет рассматриваться только UHF RFID, так как именно эта технология позволяет идентифицировать объекты, оснащенные RFID-метками, на значительных расстояниях от считывателя, расположенного на БПЛА или над полотном автодороги.

Стандарт EPC Class 1 Generation 2 [7] (ISO/IEC 18000-6С, ГОСТ Р 58701–2019) [13] описывает физический (PHY) и канальный (MAC) уровни системы радиочастотной идентификации пассивных и полупассивных меток. На физическом уровне стандарт описывает способы модуляции и кодиро-



вания сигналов, а на канальном уровне – протокол обмена данными между считывателем и метками. Протокол основан на стандарте Slotted ALOHA, описанном в работе [14]. Он позволяет бороться с коллизиями при нахождении нескольких меток в зоне считывателя, а также содержит средства для чтения и записи данных на метки.

Для подключения RFID-считывателей к системам управления используются стандартные протоколы, которые поддерживаются большинством производителей. Протокол Low Level Reader Protocol (LLRP) [15] определяет низкоуровневый интерфейс между считывателем и контроллером. Этот протокол позволяет выполнять произвольные операции доступа и инвентаризации, настраивать параметры радиоинтерфейса считывателя, получать данные о состоянии радиоканала и диагностические данные о работе считывателя. Протокол LLRP поддерживается большинством существующих считывателей. Стандарт определяет возможность работы протокола по каналам TLS (*transport layer security*). Помимо LLRP, организация EPCglobal опубликовала несколько стандартов [16–19], которые можно использовать при разработке считывателя и системы управления. Стандарт Reader Management 1.0.1 (RM) [16] определяет модель системы и МИБ (*Management Information Base*) для сбора данных о состоянии работы считывателя через протокол SNMP. Стандарт Discovery, Configuration, and Initialization (DCI) for Reader Operations [17] позволяет считывателю, контроллерам и LLRP-клиентам находить друг друга в сети, производить аутентификацию между контроллерами и считывателями, управлять работой считывателей, загружать новые образы программного обеспечения и выполнять прочие служебные функции. Стандарт Application Level Events (ALE) Standard [18, 19] описывает рекомендации по разработке промежуточного программного обеспечения.

Стандарты RFID непрерывно совершенствуются, появляются новые дополнения и спецификации. В 2020 г. альянсом RAIN RFID предложена спецификация интерфейса между считывателем и контроллером [20]. Эта спецификация более высокоуровневая по сравнению с LLRP. Она описывает основные действия, включая конфигурацию и получение статуса считывателя, настройки радиопротокола, доступ к меткам. Спецификация определяет сообщения, передаваемые между считывателем и контроллером, в формате JSON, а также их использование для решения проблемы идентификации транспорта [21].

## 2. ИССЛЕДОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОГО КАНАЛА RFID-СИСТЕМ

Затухание сигналов в беспроводном канале связи UHF RFID-системы существенно влияет на дальность идентификации объекта (расстояние между меткой и считывателем). Дальность идентификации является одним из наиболее важных показателей эффективности систем радиочастотной идентификации, так как от данного параметра зависит принципиальная возможность использования RFID на транспорте.

Большой вклад в изучение вопросов затухания сигналов в канале и исследования характеристик протокола связи стандарта UHF RFID внесли работы К.В. Рао и П.В. Никитина. В частности, в публикациях [22–24] дано описание параметров и структуры пассивных меток, а также антенных устройств в их составе, оказывающих наибольшее влияние на дальность считывания в UHF RFID-системе. К ним относятся:

- Порог чувствительности чипа метки  $P_{th}$  – минимальная мощность, необходимая для включения RFID-чипа. Чем он ниже, тем больше расстояние, на котором может быть обнаружена метка.
- Усиление антенны метки  $G_r$ , зависящее от формы диаграммы направленности антенны, ограниченное рабочей частотой и размерами метки.
- Коэффициент согласования поляризации  $\chi$ , характеризующий совпадение поляризации антенны метки с поляризацией антенны считывателя. Для увеличения дальности действия поляризации должны совпадать.
- Коэффициент передачи мощности  $\tau$  характеризует согласование импеданса между антенной и чипом также влияет на дальность действия.

Величина  $P_{tag}$  мощности, необходимой для активации метки, определяется неравенством [25, 26]

$$P_{tag} = P_t G_t P_l G_r \chi \tau \geq P_{th},$$

где  $P_t$  – излучаемая считывателем мощность;  $G_t$  – усиление антенны считывателя;  $P_l$  – потери на пути распространения сигнала. Следует отметить, что максимальная допустимая величина мощности считывателя ограничивается законодательством (например, в США это 4 Вт).

На вероятность успешного обнаружения метки оказывают значительное влияние особенности протокола связи и помехи от сигналов других считывателей и меток. Идеальный считыватель всегда может обнаружить пассивную RFID-метку, если она получает достаточную энергию для включения

и обратного рассеяния. Как правило, в диапазоне сверхвысоких частот необходимая мощность, принимаемая меткой, оценивается с помощью модели распространения сигналов в свободном пространстве, основанной на формуле Фрииса [27]

$$P_r = \frac{P_t G_t(\theta, \phi) G_r(\theta, \phi) \lambda^2}{(4\pi)^2 r^2},$$

в которой  $P_r$  – принятая меткой мощность;  $\lambda$  – длина волны;  $r$  – расстояние между антеннами,  $\theta$  и  $\phi$  – углы азимута и места соответственно, показывающие зависимость диаграммы направленности от положения в пространстве;  $t$  – передатчик (от англ. *transmitter*; как правило, относится к считывателю);  $r$  – приемник (от англ. *receiver*; как правило, относится к метке). Отметим, что в настоящее время гораздо более точные оценки могут быть получены благодаря сложному моделированию распространения электромагнитных волн с учетом значений различных параметров приемника и передатчика, а также канала распространения сигнала [28].

Так как в основном применяются пассивные метки ввиду их дешевизны и простоты, то именно их чувствительность и конструкционные особенности выступают основным ограничивающим фактором дальности связи всей RFID-системы. Поэтому их устройству посвящено большое количество исследований, описание которых приведено в обзоре [29]. В докладе [30] приведены результаты тестирования многих типов меток на лабораторном стенде. Исследованы такие параметры, как корректность ответов меток на соответствующие команды считывателя, входной импеданс, рабочий диапазон мощности микросхемы метки, а также эффективность обратного рассеивания. В публикации [31] авторы рассматривают параметры метки, отвечающие за бюджет канала связи со считывателем. Описывается оборудование, необходимое для проведения экспериментов по измерению производительности RFID-канала. В работе [32] анализируется влияние протокола Gen2 [7] на чувствительность метки и эффективность ее обратного рассеяния. Проведен эксперимент по измерению значений этих характеристик для различных UHF RFID-меток.

Большое количество статей посвящено характеристикам протокола связи и математическим моделям канала между считывателем и меткой. Рассматривается многолучевое распространение сигнала, а также зависимость качества связи от

эффекта Доплера. Например, в докладах [33, 34] описывается разработанный метод визуализации распространения сигнала в UHF RFID-системе. Данный метод применяется для оценки скорости чтения метки при наличии различных препятствий, а также в зависимости от высоты подвеса антенны считывателя и высоты расположения метки. Разработана математическая модель, основанная на уравнении Фрииса, модифицированном для двух- и трехлучевого случаев распространения сигналов. В статье также описаны проведенные эксперименты по определению необходимой мощности для активации метки в безэховой камере.

В статьях [35–38] представлены модели канала связи для оценки мощности, передаваемой считывателем метке, необходимой для ее активации, а также выбор различных вариантов организации антенных систем, отвечающих за передачу и прием сигналов в RFID-системе. Некоторые модели канала создаются не только для расчета уровня затухания, но и для определения вероятности успешного обмена данными. Например, в статье [39] строится модель канала, учитывающая поляризацию антенн и материалов объектов, от которых происходит отражение. Разработанная модель позволяет определять плотность вероятности успешного чтения в любой точке исследуемого пространства, рассматривая множество отраженных лучей. Теоретические результаты сравниваются с экспериментальными. В работе [24] обсуждается канал связи считыватель – метка – считыватель. Описываются различные конфигурации антенн считывателя, приводится анализ их недостатков и достоинств. Обсуждаются вопросы поляризации антенны считывателя. Описывается модель потерь в канале беспроводной связи с учетом многолучевого распространения сигнала.

Значительный вклад в развитие исследований беспроводного RFID-канала внесла работа [27]. В ней рассматривается вопрос определения дальности считывания в RFID-системах с учетом рабочего цикла опроса меток и региональных ограничений мощности, а также диаграммы направленности антенн считывателя и метки. В данной статье также рассматриваются модели канала для оценки зоны считывания систем UHF RFID с разным уровнем детализации и вычислительной сложности.

Анализ большого количества статей в рамках тематики настоящего раздела позволяет классифицировать их в соответствии с табл. 1.



Таблица 1

**Классификация статей, относящихся к  
исследованию беспроводного канала связи в  
RFID-системе**

Предмет исследования	Статьи
Факторы, влияющие на дальность чтения меток	[22, 24, 32]
Исследование характеристик канала	[23, 27, 33–39]
Конструкция и параметры меток	[25, 29–32]
Нестандартные применения	[26]

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ RFID НА НАЗЕМНОМ ТРАНСПОРТЕ

Исторически одним из первых применений технологии RFID на транспорте стало ее использование на платных автодорогах для идентификации автомобилей и сбора платы за проезд. Впервые такие системы начали использоваться в 1980-х гг. в США. В 1990-е годы применение RFID на платных дорогах стало повсеместным не только в США, но и в европейских странах [40, 41].

Вопросам идентификации наземных транспортных средств с использованием RFID-технологий посвящено значительное количество публикаций. Информация об идентифицированных автомобилях может эффективно использоваться во многих целях: например, для управления шлагбаумом и оплаты проезда ТС, корректировки фаз светофоров, поиска угнанных машин и т. д. [42–45]. Один из примеров применения системы на базе RFID изложен в работе [46], где описывается аппаратно-программный комплекс для создания системы контроля управления доступом автомобилей в университетский кампус. Описан эксперимент, в котором была протестирована работоспособность и стабильность функционирования разработанной системы. В нем приняло участие 20 автомобилей, оборудованных RFID-метками. В результате были сделаны выводы о загруженности тех или иных проездов, а также времени пребывания автомобилей на территории кампуса. Для увеличения радиуса действия системы идентификации можно использовать активные метки [47].

Другая задача решалась в работах [48–50], где было дано описание принципов построения и реализации автоматизированной системы контроля нарушений правил дорожного движения с использованием RFID-технологий. Проведен крупномасштабный эксперимент с участием 800 автомобилей, в номерные знаки которых были установлены пассивные RFID-метки, а считыватели располага-

лись над полотном автодороги. Трехмесячные испытания, проведенные в зимнее время, показали, что применение RFID-технологии обеспечивает вероятность обнаружения транспортного средства порядка 95 % [51]. Результаты эксперимента совпали с теоретическими исследованиями по оценке вероятности радиочастотной идентификации транспортных средств [52–55]. Контроль времени нахождения транспорта в пути также изучается в работе [56], где используются данные с RFID-считывателей. Проведено сравнение результатов теоретической модели с экспериментальными данными.

В статьях [57–59] предлагается метод измерения скорости автомобиля путем оценки мощности принятого считывателем сигнала от RFID-метки. В частности, в докладах [57, 58] описан метод решения этой задачи при расположении RFID-меток в дорожном полотне и RFID-считывателей на ТС. В статье [59] предлагается использовать RFID для мониторинга трафика и определения скорости движения автомобилей в случае размещения RFID-метки на номерном знаке ТС, а считывателя над полотном автодороги.

В последнее время актуальной темой становятся автомобильные самоорганизующиеся сети (англ. *Vehicular ad hoc networks*, VANETs) [60, 61], которые обеспечивают высокоскоростную связь от различных устройств на дорогах, включая RFID-считыватели, с базами данных центра управления. Сети VANET являются одной из главных составных частей интеллектуальной транспортной системы (англ. *Intelligent Transportation System*, ITS) [61–63]. В подобных системах предполагается использование большого количества технологий и различных систем связи, причем особое место в них занимает RFID [50, 52, 54, 64–69]. В работе [64] представлена система мониторинга транспортного потока, обнаружения дорожно-транспортных происшествий с помощью радиочастотной идентификации. Решается задача поиска оптимальных мест для установки считывателей с целью минимизации затрат на разворачивание системы. В работах [62, 70, 71] рассматривается метод оптимального размещения базовых станций беспроводной сети вдоль протяженных транспортных магистралей для сбора информации от систем видеофиксации и оперативной передачи данных о нарушениях ПДД в центр управления. Этот метод был применен при проектировании реализации эффективно функционирующей широкополосной высокоскоростной беспроводной сети вдоль Казанской объездной дороги (М7 Волга).

В статье [65] представлен метод обнаружения пробок на дорогах в городских условиях, который использует позиционирование ТС на основе RFID. При этом подразумевается, что все транспортные средства смогут обмениваться данными друг с другом и образовывать кластеры, объединенные VANET-сетью. В докладе [66] представлен прототип системы мониторинга трафика транспортных средств. Система состоит из пьезодатчиков, установленных под дорожным покрытием для оценки плотности потока, а также RFID-считывателей, принимающих информацию от меток, расположенных на автомобилях. Система предназначена для обеспечения приоритета движения на перекрестках специальным транспортным средствам (скорой помощи, полиции и т. д.) В статье [67] описана архитектура системы, идентифицирующей большое количество автомобилей в единицу времени, а также рассматриваются зоны считывания RFID-меток и их зависимость от скорости ТС. Описана математическая модель, учитывающая особенности протокола RFID, скорость движения и другие параметры. Аналитические результаты сравниваются с данными экспериментов. Оценка производительности систем идентификации ТС на основе UHF RFID рассмотрена в работе [72]. Исследуется возможность идентификации меток, расположенных как на автомобилях, так и на поездах. Разработаны модели определения оптимального расположения метки на различных транспортных средствах.

Ряд работ посвящены исследованию вопросов определения местоположения транспортного средства с использованием RFID-технологий. Несмотря на то, что в настоящее время повсеместное распространение получили спутниковые навигационные системы (ГЛОНАСС и GPS), актуальным остается вопрос повышения их точности в том числе с помощью технологии радиочастотной идентификации. В работе [73] представлен метод позиционирования транспортных средств, использующий данные GPS, уточненные с помощью технологии RFID. Для этого предлагается устанавливать считыватель на движущемся ТС, а метки, хранящие информацию о своем точном местоположении, на различных объектах дорожной инфраструктуры. Разработаны математические модели для расчета погрешности определения местоположения. В публикации [74] протокол RFID используется для определения местоположения ТС и последующей передачи этих данных через сеть VANET на сервер для планирования и оценки маршрута в реальном времени. Приводятся результаты сравнения для двух случаев: использова-

ние только технологии GPS и использование RFID совместно с VANET. В работе [75] рассматривается система определения местоположения и идентификации препятствий в условиях плохой видимости. Описывается аналитическая модель канала связи, в том числе для случая двухлучевого распространения. Проводится математическое моделирование предложенной системы, а также лабораторный и полевой эксперименты.

Размещать метки можно не только на дорожной инфраструктуре, но и непосредственно в дорожном полотне, как предлагается в работе [76]. Благодаря этому машины, оснащенные считывателями, могут определять свое местоположение. В статье исследуются алгоритмы борьбы с коллизиями, возникающими при попытке чтения одной метки несколькими считывателями одновременно. Оценивается эффективность предложенных алгоритмов с помощью имитационного моделирования.

Определение местоположения актуально не только на автомобильных дорогах общего пользования, но и на железнодорожном транспорте для точного позиционирования составов. В работах [77, 78] исследуются вопросы идентификации сверхвысокоскоростных поездов, скорость которых достигает 500 км/ч. Предлагается устанавливать считыватели между шпалами, а поезда оснащать набором меток, закрепленных по всей длине состава. В докладе [79] предлагается иной способ определения местоположения железнодорожного транспорта путем крепления считывателя на поезде, который будет получать информацию о местоположении от меток, распределенных по пути его следования. Аналогичный метод рассматривается в работе [80], где предложено использовать RFID в системе метрополитена для уточнения данных о местоположении, полученных методом одометрии, традиционным для подземных железных дорог.

Технология RFID в области транспорта может быть также применена для решения различных проблем, не связанных напрямую с идентификацией объектов. Множество дорожно-транспортных происшествий происходит из-за усталости и засыпания водителя за рулем. В настоящее время системы, предотвращающие засыпание водителя, начинают активно использоваться в общественном транспорте [81]. В публикации [82] предлагается аналогичная система, в работе которой применяется технология RFID. Другой пример использования RFID представлен в докладе [83], где описаны алгоритм движения и лабораторный стенд для робота малых размеров, оборудованного RFID-считывателем, благодаря которому робот движется вдоль траектории, выделенной RFID-метками.



В 2022 г. опубликована работа [68], в которой впервые в мировой практике дано описание разработанного гибридного комплекса идентификации ТС на базе совместного использования существующих систем видеофиксации ТС и RFID-технологий. Гибридный комплекс, предназначенный для реализации опытных зон новой системы повышения безопасности на автодорогах в Москве, Санкт-Петербурге и Казани, прошел успешные испытания на полигоне ГИБДД Республики Татарстан.

Классификация публикаций по возможным применениям радиочастотной идентификации на транспорте приведена в табл. 2.

Таблица 2

#### Сферы применения RFID на транспорте

Применение RFID	Работы
Идентификация транспорта	[42–47, 56, 67, 84–88]
Измерение скорости ТС	[57–59]
Умные автодороги	[48–54, 60–70, 72]
Железнодорожный транспорт	[77–80]
Определение местоположения ТС	[73–76]
Нестандартные применения	[82, 83]

#### 4. ПРИМЕНЕНИЕ RFID НА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Беспилотные летательные аппараты широко применяются в гражданских и оборонных отраслях [89–91]. В последние годы в различных целях начинает активно применяться совместное использование RFID-технологии и БПЛА. Одним из наиболее распространенных сценариев совместного использования технологий RFID и БПЛА является установка считывателя на борт беспилотного аппарата, с которого осуществляется опрос меток, расположенных на идентифицируемых объектах. Например, в статьях [92, 93] рассматривается сбор данных о растениях на сельскохозяйственных полях с помощью БПЛА. Описаны эксперименты, определяющие оптимальную высоту полета БПЛА и другие параметры, которые оказывают существенное влияние на вероятность чтения RFID-меток. В статье [93] также описываются эксперименты по исследованию различных алгоритмов полета БПЛА с RFID-считывателем, осуществляемые с целью определения скорости полета над каждой меткой для считывания ее с заданной вероятностью. С помощью радиочастотной иденти-

фикации и БПЛА можно также решать некоторые задачи, связанные с морским и рыбным промыслом. Например, в публикации [94] рассматривается проблема брошенных рыболовных снастей для выращивания устриц, расположенных в юго-западной части Тайваня. Для решения этой проблемы предлагается устанавливать RFID-метки в снасти для их обнаружения с использованием считывателя на БПЛА.

Состояние почвы на больших открытых пространствах можно определять с помощью опроса с БПЛА сенсорных меток, в которые встроен датчик температуры, влажности и т. д. (можно измерять только один конкретный параметр) [95]. Такие метки могут быть пассивными и полупассивными и их можно найти в продаже на сайтах производителей [96, 97]. В работе [98] рассматривается сбор информации с сенсорных меток с БПЛА, который пролетает по маршруту с известными координатами точек расположения RFID-меток. По достижении соответствующей точки БПЛА снижается на высоту до 1 м и зависает на время сбора информации с метки, а затем перелетает к следующей точке. Разработан алгоритм передачи информации от метки на сервер через ретранслятор, расположенный на БПЛА.

С помощью сенсорных RFID-меток и БПЛА можно также собирать данные о температуре или влажности воздушных масс [99–101]. С целью составления пространственной карты окружающей среды предложено использование роя сверхмалых БПЛА с сенсорными RFID-метками на борту и дрона больших размеров, оснащенного RFID-считывателем [100, 101]. Строится математическая модель, результаты вычислений сравниваются с экспериментальными данными по измерению температуры воздуха на разных высотах. В статье [102] проводится сравнительный анализ параметров канала связи между RFID-считывателем на БПЛА и разными типами меток (пассивными и полупассивными).

В работе [103] рассматривается вопрос оценки состояния упаковки продуктов питания, хранящихся на больших складах. Авторы предлагают использовать БПЛА с установленным RFID-считывателем для сбора информации со специально разработанных меток, позволяющих определить состояние упаковочного материала.

В работах [104–106] обсуждаются вопросы определения местоположения объектов с совместным применением технологий RFID и БПЛА. Разработан алгоритм, использующий данные о местоположении БПЛА и траектории его полета для по-

иска меток, расположенных в заранее неизвестных местах. Для этого БПЛА оборудован не только RFID-считывателем и Wi-Fi-модулем для управления с земли, но и модулем GPS. Дается описание математических моделей системы определения местоположения объектов, результаты которого сравниваются с результатами полевых экспериментов.

В статье [107] рассматривается один из методов локализации, основанной на измерении мощности принимаемого сигнала (англ. *Received Signal Strength*, RSS). Метод обеспечивает решение проблемы слежения за БПЛА путем сбора значений RSS между БПЛА, на котором закреплена RFID-метка, и считывателем, расположенным на земле. В работе [108] также рассматривается вопрос оценки вероятности чтения неподвижных меток, расположенных на земле, со считывателя, который закреплен на БПЛА, с использованием как аналитического, так и имитационного моделирования. Определяются оптимальные параметры полета БПЛА и настройки протокола RFID для успешного чтения метки.

Определять положение промаркированных объектов можно также внутри помещений. В публикации [109] предложена система позиционирования запасов на крупных складах, где различные объекты хранятся на нескольких уровнях вертикальных стеллажей. Разработан алгоритм поиска объектов с помощью RFID-считывателя на БПЛА, который позволяет определить не только стеллаж, но и номер полки, на которой находится искомый объект. Для увеличения точности определения местоположения применяются методы машинного обучения [110]. Предлагается также использовать две антенны RFID-считывателя, чтобы летящий БПЛА мог идентифицировать объекты на полках с двух сторон одновременно. Проведенные эксперименты подтвердили высокую точность предложенного подхода.

Применение RFID совместно с БПЛА можно использовать для аутентификации беспилотных летательных аппаратов на военных объектах. Этот вопрос рассматривается в работе [91]. В статье описан защищенный алгоритм связи между меткой на БПЛА и наземным стационарным считывателем.

В статье [111] представлена концепция умной парковки, в соответствии с которой предполагается поиск свободных мест с помощью RFID-считывателя, закрепленного на БПЛА. Практическую реализацию подобной системы разработала компания Exponent [112]. Помимо определения свободного места на парковке разработанная система позволяет узнать местоположение автомобиля относительно других машин. Другой проект этой же компании заключался в идентификации и определении местоположения металлоконструкций на складе с помощью активных меток. Аналогичные услуги предоставляют компании [113, 114], у которых для различных целей мониторинга и идентификации объектов имеются соответствующие БПЛА, оснащенные специализированным оборудованием, включая оборудование RFID.

Отметим, что в существующей литературе отсутствует ряд важных исследований, в частности применения RFID-технологии для точной посадки БПЛА, решения проблемы локальной навигации высотных беспилотных платформ в условиях отсутствия сигналов спутниковой навигации, что может рассматриваться в качестве предмета дальнейших разработок. Перспективным направлением дальнейших исследований может также стать применение RFID-технологии для решения актуальной проблемы идентификации неопознанных БПЛА [115–118].

Совместное использование RFID и БПЛА можно разделить на несколько направлений, представленных в табл. 3.

Таблица 3

**Направления совместного использования технологий RFID и БПЛА**

Применение RFID на БПЛА	Место крепления метки	Статьи
Сбор данных из труднодоступных мест	Идентифицируемый объект	[92–94; 99, 100, 102, 109]
Сбор данных с сенсорных меток	Идентифицируемый объект	[95, 98, 101, 103]
	БПЛА	[99, 100]
Определение местоположения	Стены и поверхности	[104–107, 109, 111]
Военное дело	БПЛА	[91]



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе приведен обзор статей в области интенсивно развивающегося направления использования RFID для идентификации быстро движущихся транспортных средств, что в настоящее время нашло слабое отражение в существующих мировых обзорах.

Рассмотрены стандарты RFID, а также множество работ, посвященных особенностям распространения сигналов в беспроводном канале связи между RFID-метками и считывателем. Приведен обзор публикаций по оценке параметров дальности считывания информации в RFID-системах, от которых зависит принципиальная возможность применения RFID-технологий на транспорте. Дано описание теоретических и экспериментальных результатов, а также архитектуры и аппаратно-программных средств практической реализации систем идентификации наземных транспортных средств, применяемых в различных областях. Приведен также обзор публикаций о применении RFID на беспилотных летательных аппаратах.

В конце каждого раздела приведен анализ количества статей (в основном зарубежных) и их распределение по тематическим направлениям данного раздела. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что технология RFID наиболее широко используется на наземном транспорте в следующих целях: идентификации ТС при проезде по платным дорогам; обнаружения автомобилей, нарушающих ПДД; управления движением транспорта на перекрестках и т. д. Перспективным направлением является также применение радиочастотной идентификации на железнодорожном транспорте и в метрополитенах для определения местоположения ТС и повышения безопасности движения.

Следует отметить, что в современной отечественной и зарубежной литературе практически отсутствует описание применения перспективной RFID-технологии при решении следующих актуальных проблем: идентификация несанкционированных БПЛА, точной посадки БПЛА, локальной навигации привязных высотных беспилотных платформ и т. д., что может стать предметом дальнейших исследований в этой области.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jung, K., Lee, S. A Systematic Review of RFID Applications and Diffusion: Key Areas and Public Policy Issues // *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. – 2015. – Vol. 1, no. 9. – P. 1–9.
2. Sharma, D.K., Mahto, R.V., Harper Ch., Alqattan, Sh. Role of RFID Technologies in Transportation Projects: A Review // *International Journal of Technology Intelligence and Planning*. – 2020. – Vol. 12, no. 4. – P. 349–377.
3. Casella, G., Bigliardi, B., Bottani, E. The Evolution of RFID Technology in the Logistics Field: A Review // *Procedia Computer Science*. – 2022. – Vol. 200, no. 1. – P. 1582–1592.
4. Kunthoth, J., Karkar, A., Al-Maadeed, S., Al-Ali, A. Indoor Positioning and Wayfinding Systems: A Survey // *Human-centric Computing and Information Sciences*. – 2020. – Vol. 10, no. 1. – P. 2–41.
5. ISO 14223-1:2011. Radiofrequency Identification of Animals. – Geneva: ISO, 2011.
6. ISO/IEC TS 24192-2:2021. Cards and Security Devices for Personal Identification – Communication Between Contactless Readers and Fare Media Used in Public Transport. – Geneva: ISO, 2021.
7. EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID Standard. Specification for RFID Air Interface Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz. Release 2.1. – Wellington: EPCGlobal, 2015. – 157 p.
8. Cho, J.H., Cho, M.W. Effective Position Tracking Using B-spline Surface Equation Based on Wireless Sensor Networks and Passive UHF-RFID // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2013. – Vol. 62, no. 9. – P. 2456–2464.
9. Park, S., Lee, H. Self-recognition of Vehicle Position Using UHF Passive RFID Tags // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2013. – Vol. 60, no. 1. – P. 226–234.
10. Griggs, W.M., Verago, R., Naoum-Sawaya, J., et al. Initial Position Estimation Using RFID Tags: A Least-Squares Approach // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2010. – Vol. 59, no. 11. – P. 2863–2869.
11. Wynnita, M. Griggs, Rudi Verago, Joe Naoum-Sawaya, et al. Localizing Missing Entities Using Parked Vehicles: An RFID-Based System // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2018. – Vol. 5, no. 5. – P. 4018–4030.
12. Finkeneller, K. RFID Handbook. – New York: John Wiley and Sons, 2003. – 480 p.
13. ГОСТ Р 58701–2019 (ИСО/МЭК 18000–63:2015) Информационные технологии. Идентификация радиочастотная для управления предметами. Часть 63. Параметры радиointерфейса для диапазона частот 860–960 МГц (Тип С). – М.: Стандартинформ, 2019. [GOST R 58701–2019 (ISO/МЭК 18000-63:2015) Informatsionnye tekhnologii. Identifikatsiya radiochastotnaya dlya upravleniya predmetami. Chast' 63. Parametry radiointerfeisa dlya diapazona chastot 860 – 960 MGts (Tip S). – M.: Standartinform, 2019. (In Russian)]
14. Abramson, N. The Aloha System – Another Alternative for Computer Communications // *Proceedings of the 1970 Fall Joint Computer Conference AFIPS'70*. – New York, USA: ACM Press, 1970. – 281 p.
15. Low Level Reader Protocol (LLRP). Version 1.1 Ratified Standard. – Wellington: EPCGlobal, 2010. – 198 p.
16. Reader Management 1.0.1. – Wellington, EPCGlobal, 2007. – 242 p.
17. Discovery, Configuration, and Initialization (DCI) for Reader Operations. Version 1.0 Ratified Standard. – Wellington: EPCGlobal, 2009. – 26 p.
18. The Application-Level Events (ALE) Specification, Version 1.1.1. Part I: Core Specification. – Wellington: EPCGlobal, 2009. – 229 p.

19. *The Application-Level Events (ALE) Specification, Version 1.1.1. Part II: XML and SOAP Bindings.* – Wellington: EPCGlobal, 2009. – 119 p.
20. *RAIN Reader Communication Interface Guideline. V.4.0.* – Wakefield: RAIN RFID Alliance, 2020. – 82 p.
21. *Electronic Vehicle Identification RAIN RFID. White Paper* – Wakefield: RAIN RFID Alliance, 2018. – 10 p.
22. *Nikitin, P.V., Rao, K.V. Performance Limitations of Passive UHF RFID Systems // IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest).* – Albuquerque, 2006. – P. 1011–1014.
23. *Nikitin, P.V., Rao, K.V. Theory and Measurement of Backscattering from RFID Tags // IEEE Antennas and Propagation Magazine.* – 2006. – Vol. 48, no. 6. – P. 212–218.
24. *Nikitin, P.V., Rao, K.V. Antennas and Propagation in UHF RFID Systems // 2008 IEEE International Conference on RFID (Frequency Identification), IEEE RFID 2008.* – Las Vegas, 2008. – P. 277–288.
25. *Rao, K.V., Lam, S.F., Nikitin, P.V. Wideband Metal Mount UHF RFID Tag // 2008 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, APSURSI.* – San Diego, 2008. – DOI: 10.1109/APS.2008.4619583.
26. *Nikitin, P.V., Martinez, R., Ramamurthy, S., et al. Phase Based Spatial Identification of UHF RFID Tags // RFID 2010: International IEEE Conference on RFID.* – Orlando, 2010. – P. 102–109.
27. *Marrocco, G., Di Giampaolo, E., Aliberti, R. Estimation of UHF RFID Reading Regions in Real Environments // IEEE Antennas and Propagation Magazine.* – 2009. – Vol. 51, no. 6. – P. 44–57.
28. *Alhassoun, M., Durgin, G.D. A Theoretical Channel Model for Spatial Fading in Retrodirective Backscatter Channels // IEEE Transactions on Wireless Communications.* – 2019. – Vol. 18, no. 12. – P. 5845–5854.
29. *Marrocco, G. The art of UHF RFID Antenna Design: Impedance-Matching and Size-Reduction Techniques // IEEE Antennas and Propagation Magazine.* – 2008. – Vol. 50, no. 1. – P. 66–79.
30. *Mayer, L. W., Scholtz, A.L. Sensitivity and Impedance Measurements on UHF RFID Transponder Chips // Int. EURASIP Workshop on RFID Techn.* – Vienna, 2007. – P. 1–10.
31. *Nikitin, P., Rao, K.V.S., Lam, S. UHF RFID Tag Characterization: Overview and State-of-the-Art // 34th AMTA Annual Meeting, Antenna Measurement Techniques Association Symposium.* – 2012. – No. 2. – P. 2–7.
32. *Nikitin, P. V., Rao, K.V. Effect of Gen2 Protocol Parameters on RFID Tag Performance // 2009 IEEE International Conference on RFID, RFID 2009.* – Orlando, 2009. – P. 117–122.
33. *Banerjee, S., Jesme, R., Sainati, R. Performance Analysis of Short Range UHF Propagation as Applicable to Passive RFID // 2007 IEEE International Conference on RFID, IEEE RFID 2007.* – Grapevine, 2007. – P. 30–36.
34. *Banerjee, S. R., Jesme, R., Sainati, R.A. Investigation of Spatial and Frequency Diversity for Long Range UHF RFID // 2008 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, APSURSI.* – San Diego, 2008. – DOI: 10.1109/APS.2008.4619726.
35. *Griffin, J.D., Durgin, G.D. Reduced Fading for RFID Tags with Multiple Antennas // IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest).* – Honolulu, 2007. – P. 1201–1204.
36. *Griffin, J.D., Durgin, G.D. Complete Link Budgets for Backscatter-Radio and RFID Systems // IEEE Antennas and Propagation Magazine.* – 2009. – Vol. 51, no. 2. – P. 11–25
37. *Trotter, M.S., Griffin, J.D., Durgin, G.D. Power-Optimized Waveforms for Improving the Range and Reliability of RFID Systems // 2009 IEEE International Conference on RFID, RFID 2009.* – Orlando, 2009. – P. 80–87.
38. *Hasan, A., Zhou, C., Griffin, J.D. Experimental Demonstration of Transmit Diversity for Passive Backscatter RFID Systems // 2011 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications, RFID-TA 2011.* – Sitges, 2011. – P. 544–548.
39. *Dimitriou, Antonis, G., Siachalou, Stavroula, Bletsas, Aggelos, et al. A Site-Specific Stochastic Propagation Model for Passive UHF RFID // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.* – 2014. – Vol. 13. – P. 623–626.
40. *Blythe, P. RFID for Road Tolling, Road-Use Pricing and Vehicle Access Control // IEE Colloquium (Digest).* – 1999. – No. 123. – P. 67–82.
41. *Landt, J. The History of RFID // IEEE Potentials.* – 2005. – Vol. 24. – P. 8–11.
42. *Tseng, J.D., Wang, W.D., Ko, R.J. An UHF Band RFID Vehicle Management System // 2007 IEEE International Workshop on Anti-counterfeiting, Security, Identification, ASID.* – Xiamen, 2007. – P. 390–393.
43. *Bhavke, A., Pai, S. Smart Weight Based Toll Collection & Vehicle Detection During Collision Using RFID // 2017 International Conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems, ICMDCS 2017.* – Vellore, 2017. – P. 1–6.
44. *Rajeshwari, S., Santhosh, H., Varaprasad, G. Implementing Intelligent Traffic Control System for Congestion Control, Ambulance Clearance, and Stolen Vehicle Detection // IEEE sensors journal.* – 2015. – Vol. 15, no. 2. – P. 260–263.
45. *Balbin, J.R., Garcia, R.G., Valiente, F.L., et al. Vehicle Identification System through the Interoperability of an Ultra High Frequency Radio Frequency Identification System and Its Database // HNICEM 2017 – 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management.* – Manila, 2017. – Vol. 2018. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/HNICEM.2017.8269457.
46. *Pedraza, C., Vega, F., Manana, G. PCIV, an RFID-Based Platform for Intelligent Vehicle Monitoring // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine.* – 2018. – Vol. 10, no 2. – P. 28–35.
47. *Khan, A. A., Yakzan, A.I., Ali, M. Radio Frequency Identification (RFID) Based Toll Collection System // Proceedings – 3rd International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, CICSyN 2011.* – Bali, 2011. – P. 103–107.
48. *Вишнеvский В., Минниханов Р. Автоматизированная система контроля нарушений правил дорожного движения с использованием RFID-технологий и новейших беспроводных средств // Труды 2-й Международной научно-практической конференции «Современные проблемы безопасности: теория и практика».* – Казань, 2012. – С. 52–62. [Vishnevskii, V., Minnikhanov, R. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya narushenii pravil dorozhnogo dvizheniya s ispol'zovaniem RFID-tehnologii i noveishikh besprovodnykh sredstv // Trudy 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye problemy bezopasnosti: teoriya i praktika». – Kazan, 2012. – P. 52–62. (In Russian)]



49. Вишневецкий В., Минниханов Р. Новый, инновационный, аппаратно-программный комплекс системы дистанционного контроля нарушений ПДД с использованием RFID-технологий // Труды 10 международной научно-практической конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах инновации: ресурсы и возможности». – Санкт-Петербург, 2012. – С. 297–305. [Vishnevskii, V., Minnikhanov, R. Novyi, innovatsionnyi, apparatno-programmnyi kompleks sistemy distantsi-onnogo kontrolya narushenii PDD s ispol'zovaniem RFID-tekhnologii // Trudy 10 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya v krupnykh gorodakh innovatsii: resurs i vozmozhnosti». – St. Petersburg, 2010. – P. 297–305. (In Russian)]
50. Вишневецкий В.М., Минниханов Р.Н., Дудин А.Н. и др. Новое поколение систем безопасности на автодорогах и их применение в интеллектуальных транспортных системах // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2013. – № 4. – С. 80–89. [Vishnevskiy, V.M. Minnikhanov, R.N., Dudin, A.N., et al. New generation of hardware-software for road safety systems and its application in intellectual transport systems // Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. – 2013. – No. 4. – P. 80–89. (In Russian)]
51. Вишневецкий В.М., Минниханов Р.Н., Дудин А.Н. и др. Опыт реализации системы безопасности на автодорогах с использованием радиочастотной идентификации UHF-диапазона // Материалы Двадцатой международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN-2017). – Москва, 2017. – С. 152–163. [Vishnevskii, V.M., Minnikhanov, R.N., Dudin, A.N., et al. Opyt realizatsii sistemy bezopasnosti na avtodorogakh s ispol'zovaniem radiochastotnoi identifikatsii UHF-diapazona // Proceedings of the 20th International Conference, Distributed Computer and Communication Networks. – Moscow, 2017. – P. 152–163. (In Russian)]
52. Larionov, A., Ivanov, R., Vishnevsky, V. A Stochastic Model for the Analysis of Session and Power Switching Effects on the Performance of UHF RFID System with Mobile Tags // 12th Annual IEEE International Conference on RFID, RFID 2018. – Cagliari, 2018. – P. 1–8.
53. Вишневецкий В.М., Ларионов А.А., Михайлов Е.А. и др. Методы оценки эффективности систем радиочастотной идентификации транспортных средств // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2023. – Vol. 1. – P. 59–70. [Vishnevsky, V.M., Larionov, A.A. Mikhailov, E.A., et al. Evaluation of the Effectiveness of Functional Systems of Radio Frequency Identification of Vehicles // Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. – 2023. – Vol. 1. – P. 59–70. (In Russian)]
54. Larionov, A.A., Ivanov, R.E., Vishnevsky, V.M. UHF RFID in Automatic Vehicle Identification: Analysis and Simulation // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. – 2017. – Vol. 1, no. 1. – P. 3–12.
55. Jo, M., Youn, H.Y., Cha, S.H., et al. Mobile RFID Tag Detection Influence Factors and Prediction of Tag Detectability // IEEE Sensors Journal. – 2009. – Vol. 9, no. 2. – P. 112–119.
56. Gu, J., Li, M., Yu, L., et al. Analysis on Link Travel Time Estimation considering Time Headway Based on Urban Road RFID Data // Journal of Advanced Transportation. – 2021. – Vol. 2021. – Art. ID 8876626.
57. Zhai, Y., Guo, Q., Min, H. An Effective Velocity Detection Method for Moving UHF-RFID Tags // RFID-TA 2018 – 2018 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications. – Macau, 2018. – DOI: 10.1109/RFID-TA.2018.8552825.
58. Jing, T., Li, X., Cheng, W., et al. Speeding Detection in RFID Systems on Roads // 2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE 2013 – Proceedings. – 2013. – P. 953–954. – DOI:10.1109/ICCV.2013.6799939.
59. Choy, J.L.C., Wu, J., Long, C.U., et al. Low Power Vehicles Speed Monitoring for Intelligent Transport Systems // IEEE Sensors Journal. – 2020. – Vol. 20, no 11. – P. 5656–5665.
60. Al-Shareeda, M.A., Manickam, S. A Systematic Literature Review on Security of Vehicular Ad-hoc Network (VANET) based on VEINS Framework // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11, P. 46218–46228.
61. Vishnevsky, V.M., Krishnamurti, A., Kozyrev, D.V. Review of Methodology and Design of Broadband Wireless Networks with Linear Topology // Indian Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – Vol. 47. – P. 329–342.
62. Vishnevsky, V.M., Ivanov, R.E., Larionov, A.A. Optimization of Topological Structure of Broadband Wireless Networks Along the Long Traffic Routes // Communications in Computer and Information Science. – 2016. – Vol. 601. – P. 30–39.
63. Zhu, F., Lv, Y., Chen, Y., et al. Parallel Transportation Systems: Toward IoT-Enabled Smart Urban Traffic Control and Management // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2020. – Vol. 21, no. 10. – P. 4063–4071.
64. Zhang, W., Lin, B., Gao, C. Optimal Placement in RFID-Integrated VANETs for Intelligent Transportation System // RFID-TA 2018 – 2018 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications. – Macau, 2018. – DOI: 10.1109/RFID-TA.2018.8552765.
65. Zhang, E.-Z., Zhang, X. Road Traffic Congestion Detecting by VANETs // Proceedings of the 2nd International Conference on Electrical and Electronic Engineering (EEE 2019). – Hangzhou, 2019. – P. 242–248.
66. Shirabur, S., Hunagund, S., Murgud, S. VANET Based Embedded Traffic Control System // Proceedings – 5th IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology, RTEICT 2020. – Bangalore, 2020. – P. 189–192.
67. Pawlowski, B., Trybus, B., Salach, M., et al. Dynamic RFID Identification in Urban Traffic Management Systems // Sensors (Basel). – 2020. – Vol. 20, no. 15. – P. 1–26.
68. Vishnevsky, V.M. and Minnikhanov, R.N. and Barsky, I.V. et al. Development of a Hybrid Vehicle Identification System Based on Video Recognition and RFID // Proceedings of the 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies, ICCT 2022. – Astrakhan, 2022. – DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.9976609.
69. Vishnevsky, V.M., Larionov, A.A. Design Concepts of an Application Platform for Traffic Law Enforcement and Vehicles Registration Comprising RFID Technology // 2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications, RFID-TA 2012. – Nice, 2012. – P. 148–153.
70. Першин О.Ю., Вишневецкий В.М., Мухтаров А.А. Оптимальное размещение базовых станций в рамках комплексного проектирования беспроводной сети // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2022. – № 1. – С. 12–25. [Pershin, O.Yu., Mukhtarov, A.A., Vishnevskii, V.M. et al. Optimal Placement of Base Stations as Part of an Integrated Design of a Wireless Network // Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. – 2022. – Vol. 1. – P. 12–25. (In Russian)]

71. Вишнеvский В.М., Семёнова О.В., Ларионов А.А. Оценка производительности высокоскоростной беспроводной тандемной сети с использованием каналов сантиметрового диапазона радиоволн в системах управления безопасностью дорожного движения // Проблемы управления. – 2013. – № 4. – С. 50–56. [Vishnevsky, V.M., Larionov, A.A., Semenova, O.V. Performance Evaluation of the High-Speed Wireless Tandem Network Using Centimeter and Millimeter-Wave Channels // Control Sciences. – 2013. – No. 4. – P. 50–56. (In Russian)]
72. Unterhuber, A.R., Iliev, S., Biebl, E.M. Estimation Method for High-Speed Vehicle Identification with UHF RFID Systems // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. – 2020. – Vol. 4, no. 4. – P. 343–352.
73. Zheng, K., Yang, Q. Vehicle positioning method based on RFID in VANETs // ACM International Conference Proceeding Series. – Sanibel Island, 2018. – Art. no. 165.
74. Lu, Y., Wang, M. RFID Assisted Vehicle Navigation Based on VANETs // Advances in Security, Networks, and Internet of Things. – 2021. – P. 541–553.
75. Garcia Oya, J.R., Martin Clemente, R., Hidalgo Fort, E., et al. Passive RFID-Based Inventory of Traffic Signs on Roads and Urban Environments // Sensors. – 2018. – Vol. 18, iss. 7. – P. 2385.
76. Qin, H., Chen, W., Chen, W. A Collision-Aware Mobile Tag Reading Algorithm for RFID-Based Vehicle Localization // Computer Networks. – 2021. – Vol. 199. – Art. no. 108422.
77. Zhang, X., Lakafosis, V., Traille, A. et al. Performance Analysis of “Fast-Moving” RFID Tags in State-of-the-Art High-Speed Railway Systems // Proceedings of 2010 IEEE International Conference on RFID-Technology and Applications, RFID-TA 2010. – Guangzhou, 2010. – P. 281–285.
78. Zhang, X., Tentzeris, M. Applications of Fast-Moving RFID Tags in High-Speed Railway Systems // International Journal of Engineering Business Management. – 2011. – Vol. 3, no. 1. – P. 27–31.
79. Buffi, A., Nepa, P. An RFID-Based Technique for Train Localization with Passive Tags // 2017 IEEE International Conference on RFID, RFID 2017. – Warsaw, 2017. – P. 155–160.
80. Kostrominov, A.M., Tyulyandin, O.N., Nikitin, A.B. RFID-Based Navigation of Subway Trains // Proceedings of 2020 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2020. – Varna, 2020. – DOI: 10.1109/EWDTs50664.2020.9225125.
81. Система «Антисон» помогает контролировать внимание машинистов. – URL: <https://mosmetro.ru/news/details/1700> (дата обращения 28.06.2023). [Sistema «Antison» pomogaet kontrolirovat' vnimanie mashinistov. – URL: <https://mosmetro.ru/news/details/1700> (Accessed June 28, 2023). (In Russian)]
82. Yang, C., Wang, X., Mao, S. Unsupervised Drowsy Driving Detection with RFID // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2020. – Vol. 69, no. 8. – P. 8151–8163.
83. Teng, J.H., Hsiao, K.-Y., Luan, Sh.-W., et al. RFID-Based Autonomous Mobile Car // IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). – Osaka, 2010. – P. 417–422.
84. Madana A. L., Sadath L. Improved Contactless RFID Detections in Transport System // Proceedings of International Conference on Intelligent Engineering and Management, ICIEM 2020. – Moscow, 2020. – P. 465–470.
85. Lonkar, B.B., Sayankar, M.R., Charde, P.D. Design and Monitor Smart Automatic Challan Generation Based on RFID Using GPS and GSM // 3rd International Conference on Internet of Things and Connected Technologies (ICIoTCT), 2018. – Jaipur, 2018. – 6 s. – DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3168575>.
86. Sabbir, A., Tan, T.M., Mondol, A.M., et al. Automated Toll Collection System Based on RFID Sensor // Proceedings of International Carnahan Conference on Security Technology. – Chennai, 2019. – DOI:10.1109/ccst.2019.8888429.
87. Pandit, A.A., Talreja, J., Mundra, A.K. RFID Tracking System for Vehicles (RTSV) // 2009 1st International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, CICSYN 2009. – Indore, 2009. – P. 160–165.
88. Meneses González, R., Orosco Vega R., Linares Y Miranda R. Some Considerations about RFID System Performance Applied to the Vehicular Identification // 2011 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications, RFID-TA 2011. – Sitges, 2011. – P. 123–127.
89. Choi, H.W., Kim, H.J., Kim, S.K. An Overview of Drone Applications in the Construction Industry // Drones. – 2023. – Vol. 7, no. 8. – Art. no. 515.
90. Mohsan, S.A.H., Othman, N.Q.H., Li, Y., et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Practical Aspects, Applications, Open Challenges, Security Issues, and Future Trends // Intelligent Service Robotics. – 2023. – Vol. 16, no. 1. – P. 109–137.
91. Gope, P., Millwood, O., Saxena, N. A Provably Secure Authentication Scheme for RFID-Enabled UAV Applications // Computer Communications. – 2021. – Vol. 166. – P. 19–25.
92. Quino, J., Maja, J.M., Robbins, J., et al. RFID and Drones: The Next Generation of Plant Inventory // Agri. Engineering. – 2021. – Vol. 3, no. 2. – P. 168–181.
93. Quino, J., Maja, J.M., Robbins, J., et al. The Relationship between Drone Speed and the Number of Flights in RFID Tag Reading for Plant Inventory // Drones. – 2022. – Vol. 6, no. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/drones6010002>.
94. Yang, J.H., Chang, Y. Feasibility Study of RFID-Mounted Drone Application in Management of Oyster Farms // International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – Fort Worth, 2017. – P. 3610–3613.
95. Gortschacher, L.J., Grosinger, J. UHF RFID Sensor System Using Tag Signal Patterns: Prototype System // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2019. – Vol. 18, no. 10. – P. 2209–2213.
96. SMARTRAC Sensor DogBone RFID Wet Inlay (RFMicron Magnus S). – URL: <https://www.atlasrfidstore.com/smartrac-sensor-dogbone-rfid-rfmicron-magnus-s/> (дата обращения 27.01.2023). [Accessed January 27, 2023.]
97. DipoleRFID. – URL: <https://www.dipolefid.com/products/RFID-Tags/RFID-Sensors> (дата обращения 27.01.2023). [Accessed January 27, 2023.]
98. Wang, J., Schluntz, E., Otis, B. A New Vision for Smart Objects and the Internet of Things: Mobile Robots and Long-Range UHF RFID Sensor Tags // arXiv:1507.02373. – 2015. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1507.02373>.
99. Longhi, M., Casati, G., Latini, D. RFIDrone: Preliminary Experiments and Electromagnetic Models // 2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, EMTS 2016. – 2016. – P. 450–453.
100. Longhi, M., Marrocco, G. Flying Sensors: Merging Nano-UAV with Radiofrequency Identification // 2017 IEEE International Conference on RFID Technology and Application, RFID-TA. – Warsaw, 2017. – P. 164–168.



101. Longhi, M., Marrocco, G. Ubiquitous Flying Sensor Antennas: Radiofrequency Identification Meets Micro Drones // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. – 2017. – Vol. 1, no. 4. – P. 291–299.
102. Casati, G., Longhi, M., Latini, D. The Interrogation Footprint of RFID-UAV: Electromagnetic Modeling and Experimentations // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. – 2017. – Vol. 1, no. 2. – P. 155–162.
103. Almalki, F.A. Utilizing Drone for Food Quality and Safety Detection Using Wireless Sensors // 2020 3rd IEEE International Conference on Information Communication and Signal Processing, ICICSP 2020. – Shanghai, 2020. – P. 405–412.
104. Buffi, A., Nepa, P., Cioni, R. SARFID on Drone: Drone-based UHF-RFID Tag Localization // 2017 IEEE International Conference on RFID Technology and Application, RFID-TA. – Warsaw, 2017. – P. 40–44.
105. Buffi, A., Tellini, B. Measuring UHF-RFID Tag Position via Unmanned Aerial Vehicle in Outdoor Scenario // IEEE 4th International Forum on Research and Technologies for Society and Industry, RTSI 2018. – Palermo, 2018. – DOI: 10.1109/RTSI.2018.8548428.
106. Buffi, A., Motroni, A., Nepa, P., et al. A SAR-Based Measurement Method for Passive-Tag Positioning with a Flying UHF-RFID Reader // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2019. – Vol. 68, no. 3. – P. 845–853.
107. Habaebi, M.H., Omar, R.K., Islam, M.R. Mobile Drone Localization in Indoor Environment Based on Passive RFID // International Journal of Interactive Mobile Technologies. – 2020. – Vol. 14, no. 5. – P. 4–15.
108. Abramian, V., Larionov, A. Numerical Research of the Probability of Radio Frequency Identification of Tags Using a UAV-mounted RFID Reader // Proceedings of the 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies, ICCT 2022. – Sochi, 2022. – DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.9976631.
109. Li, C., Tanghe, E., Suanet, P. ReLoc 2.0: UHF-RFID Relative Localization for Drone-Based Inventory Management // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Vol. 70. – Art. no. 8003313.
110. Biau, G., Scornet, E. A Random Forest Guided Tour // Test. – 2016. – Vol. 25, no 2. – P. 197–227.
111. Wu, H.P. Intelligent Parking Management System Utilizing RFID // Proceedings of the ACM MobiSys 2019 Rising Stars Forum. – Seoul, 2019. – P. 37–41.
112. Exponent. – URL: <https://exponent-ts.com/> (дата обращения 27.01.2023). [Accessed January 27, 2023.]
113. RFID Drone. – URL: <https://squadrone-system.com/en/solutions/drone-rfid/> (дата обращения 27.01.2023). [Accessed January 27, 2023.]
114. The flying Inventory Assistant. – URL: <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2014/december/the-flying-inventory-assistant.html> (дата обращения 07.02.2023). [Accessed February 7, 2023.]
115. Alam, S.S., Chakma, A., Rahman, M.H., et al. RF-Enabled Deep-Learning-Assisted Drone Detection and Identification: An End-to-End Approach // Sensors. – 2023. – Vol. 23, no 9. – Art. no. 4202.
116. Basak, S., Rajendran, S., Pollin, S., et al. Combined RF-Based Drone Detection and Classification // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. – 2022. – Vol. 8, no. 1. – P. 111–120.
117. Sazdić-Jotić, B., Pokrajac, I., Bajčetić, J., et al. Single and Multiple Drones Detection and Identification Using RF Based Deep Learning Algorithm // Expert Systems with Applications. – 2022. – Vol. 187. – Art. no. 115928.
118. Khan, M.A., Menouar, H., Eldeeb, A., et al. On the Detection of Unauthorized Drones – Techniques and Future Perspectives: A Review // IEEE Sensors Journal. – 2022. – Vol. 22, no. 12. – P. 11439–11455.

Статья представлена к публикации членом редколлегии  
В.В. Мецераковым.

Поступила в редакцию 03.11.2023,  
после доработки 11.12.2023.  
Принята к публикации 12.12.2023.

**Абрамян Вильмен Леонович** – мл. науч. сотрудник,  
✉ e-mail: [abramian.vl@phystech.edu](mailto:abramian.vl@phystech.edu)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7763-4608>

**Вишневский Владимир Миронович** – д-р техн. наук,  
✉ e-mail: [vishn@inbox.ru](mailto:vishn@inbox.ru)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7373-4847>

**Ларионов Андрей Алексеевич** – канд. техн. наук,  
✉ e-mail: [larioandr@gmail.com](mailto:larioandr@gmail.com)

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

© 2024 г. Абрамян В.Л., Вишневский В.М., Ларионов А.А.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons  
«Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

## RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION IN TRANSPORT APPLICATIONS

V. L. Abramian\*, V. M. Vishnevsky\*\*, and A. A. Larionov\*\*\*

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*✉ abramian.vl@phystech.edu, \*\*✉ vishn@inbox.ru, \*\*\*✉ larioandr@gmail.com

**Abstract.** RFID (Radio Frequency Identification) has been widely used in many areas of science and technology as well as everyday life. An intensively developing line of RFID applications is the identification of fast-moving transport objects. Despite numerous scientific articles, the latest results on the subject are poorly reflected in the existing surveys. This paper fills the gap by over-viewing key publications on RFID technologies and standards and the features of signal propaga-tion in a wireless communication channel between RFID tags and a reader. We describe related theoretical and experimental results as well as the architecture and hardware and software tools for the practical implementation of land vehicle identification systems. In addition, this survey covers publications on utilizing RFID on the base of unmanned aerial vehicles.

**Keywords:** radio frequency identification, transport, unmanned aerial vehicle, reader, tag.

**Acknowledgments.** This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-29-00795.