

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 1. Number 89 (2026). Pp. 68–82
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.004>

VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS FOR MOTOR VEHICLES AT INTERSECTIONS

R.T. Safin¹, Y. Bagdollauly^{1}, Jia Wei²*

¹International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan;

²Harbin University of Commerce, Harbin, China.

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com

Rafail Safin — PhD, Associate Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: safin.rafail@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1583-0034>;

Yessen Bagdollauly — Senior Lecturer, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4322-0762>;

Jia Wei — Senior Lecturer, Harbin University of Commerce, Harbin, China

E-mail: 313023306@qq.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9096-473X>.

© R.T. Safin, Y. Bagdollauly, Jia Wei

Abstract. In modern urban traffic, one of the most pressing issues is ensuring road safety at intersections, where traffic flow intensity reaches its peak. This study investigates the use of radio-technical systems for tracking vehicle positions to improve measurement accuracy and traffic management. The aim of the study is to develop and analyze methods for enhancing the accuracy of vehicle position measurements at intersections using radio-technical systems. To achieve this aim, the following objectives were set: analysis of existing vehicle tracking methods, development of algorithms for distance calculation under various receiver configurations, modeling of signal attenuation using free-space and two-ray models, determination of absolute and relative measurement errors, and comparative analysis of different equipment configurations. The results demonstrated that using a single receiver leads to high measurement errors ($\Delta = 0.5$ m, $\delta = 5.3$ %), making accurate lane determination impossible. Implementing two receivers on opposite sides of the roadway significantly reduces absolute and relative errors, provides accurate lane determination, and considers the impact of weather conditions and signal reflections from the road surface in the two-ray propagation model. Modeling in Pascal confirmed the correctness of the developed distance and signal attenuation calculation algorithms and visualized signal loss dependence on distance. Using a dual-receiver configuration of radio-technical systems at intersections ensures high accuracy in vehicle position determination, reduces measurement errors, and enhances road safety. The developed methods can be integrated into intelligent transportation systems and automated traffic control systems. Future research may focus on adapting algorithms to varying weather conditions and traffic intensity.

Keywords: radio-technical system, intersection, vehicle, signal attenuation, measurement error, traffic safety

For citation: R.T. Safin, Y. Bagdollauly, Jia Wei. Video surveillance systems for motor vehicles at intersections. // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 68–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.004>.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

ЖОЛ ҚИЫЛЫСТАРЫНДА АВТОМОБИЛЬ КӨЛІГІН БЕЙНЕТІРКЕУ ЖҮЙЕЛЕРІ

Р. Сафин¹, Е. Бағдоллаұлы^{1}, Цзя Вэй²*

¹Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Харбин коммерция университеті, Харбин, Қытай.

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com

Рафаиль Сафин — PhD, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университет, Алматы, Қазақстан

E-mail: safin.rafail@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1583-0034>;

Есен Бағдоллаұлы — аға оқытушысы, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университет, Алматы, Қазақста.

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4322-0762>;

Цзя Вэй — аға оқытушы, Харбин коммерция университеті, Харбин, Қытай

E-mail: 313023306@qq.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9096-473X>.

© Р.Т. Сафин, Е. Бағдоллаұлы, Цзя Вэй

Аннотация. Қазіргі қалалық көлік жүйесінде ең өзекті мәселелердің бірі – жол-көлік қозғалысының қауіпсіздігін қамтамасыз ету, әсіресе жолайрықтарда, мұнда көлік ағымының қарқыны ең жоғары деңгейге жетеді. Бұл жұмыста радиотехника жүйелерін пайдаланып, көлік құралдарының орнын дәл өлшеу және қозғалысты басқару тиімділігін арттыру қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – радиотехникалық құралдарды қолдана отырып, көлік құралдарының жолайрықтардағы орнын анықтаудың дәлдігін арттыру әдістерін жасау және талдау. Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: көлік құралдарын бақылаудың қазіргі әдістерін талдау, әртүрлі қабылдағыш конфигурацияларында қашықтықты есептеу алгоритмдерін жасау, сигналдың әлсіреуін «еркін кеңістік» және екі сәуле моделін қолдана отырып модельдеу, абсолютті және салыстырмалы өлшеу қателерін анықтау, сондай-ақ жабдық орнату конфигурацияларын салыстырмалы талдау жүргізу. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, бір ғана қабылдағыш қолдану өлшеулерде үлкен қателікке ($\Delta = 0,5$ м, $\delta = 5,3$ %) әкеледі, бұл көліктің жолдағы орнын дәл анықтауға мүмкіндік бермейді. Жолдың екі жағына екі қабылдағыш орнату абсолютті және салыстырмалы қателерді айтарлықтай азайтады, жолдағы орынды дәл анықтауға мүмкіндік береді, сондай-ақ ауа райы жағдайлары мен жол бетінен сигналдың шағылысуын екі сәуле моделінде ескереді. Pascal тілінде модельдеу қашықтық пен сигнал әлсіреуін есептеу алгоритмдерінің дұрыстығын растап, сигнал жоғалуын қашықтыққа байланысты визуализациялады. Жолайрықтарда екі қабылдағышты радиотехникалық жүйелерді пайдалану көліктің орнын дәл анықтауға, өлшеу қателігін азайтуға және жол қозғалысының қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді. Жасалған әдістер интеллектуалды көлік жүйелеріне және автоматтандырылған бақылау жүйелеріне интеграциялануы мүмкін. Болашақ зерттеулер алгоритмдерді ауа райы мен қозғалыс қарқынына бейімдеуге бағытталуы мүмкін.

Түйін сөздер: радиотехникалық жүйе, жолайрық, көлік құралы, сигнал әлсіреуі, өлшеу қателігі, қозғалыс қауіпсіздігі

Дәйексөздер үшін: Р. Сафин, Е. Бағдоллаұлы, Цзя Вэй. Жол қиылыстарында автомобиль көлігін бейнетіркеу жүйелері // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 68–82 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.004>.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

СИСТЕМЫ ВИДЕОФИКСАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА ПЕРЕКРЁСТКАХ

Р.Т. Сафин¹, Е. Бағдоллаұлы^{1}, Цзя Вэй²*

¹Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан;

²Харбинский университет коммерции, Харбин, Китай.

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com

Рафаиль Сафин — PhD, ассоциированный профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: safin.rafil@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1583-0034>;

Есен Бағдоллаұлы — старший преподаватель, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4322-0762>;

Цзя Вэй — старший преподаватель, Харбинский университет коммерции, Харбин, Китай

E-mail: 313023306@qq.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9096-473X>.

© Р.Т. Сафин, Е. Бағдоллаұлы, Цзя Вэй

Аннотация. В современном городском транспортном пространстве одной из актуальных проблем является обеспечение безопасности движения на перекрёстках, где интенсивность транспортных потоков достигает максимальных значений. В данной работе исследуется использование радиотехнических систем для фиксации положения транспортных средств с целью повышения точности измерений и улучшения управления движением. Цель исследования – разработка и анализ методов повышения точности определения положения транспортных средств на перекрёстках с использованием радиотехнических средств. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: анализ существующих методов фиксации транспортных средств, разработка алгоритмов расчёта расстояний для различных вариантов размещения приёмных устройств, моделирование затухания радиосигнала с использованием моделей «свободное пространство» и двухлучевой модели, определение абсолютной и относительной погрешности измерений, а также сравнительный анализ различных конфигураций установки оборудования. Результаты исследования показали, что использование одного приёмного устройства приводит к высокой погрешности измерений ($\Delta = 0,5$ м, $\delta = 5,3$ %), что делает невозможным точное определение ряда, в котором находится транспортное средство. Применение двух приёмных устройств по обе стороны проезжей части значительно снижает абсолютную и относительную погрешность, обеспечивает точное определение ряда, а также учитывает влияние погодных условий и отражений сигналов от поверхности дороги при двухлучевом распространении. Моделирование на языке Pascal подтвердило корректность алгоритмов расчёта расстояний и затухания радиосигнала, визуализировав зависимость потерь сигнала от расстояния. Использование двухприёмной конфигурации радиотехнических систем на перекрёстках обеспечивает высокую точность определения положения транспортных средств, снижает вероятность ошибок измерений и повышает безопасность дорожного движения. Разработанные методы могут быть интегрированы в интеллектуальные транспортные системы и системы автоматического контроля движения, а перспективным направлением дальнейших исследований является адаптация алгоритмов под изменяющиеся погодные условия и интенсивность движения.

Ключевые слова: радиотехническая система, перекрёсток, транспортное средство, затухание сигнала, погрешность измерений, безопасность движения

Для цитирования: Р.Т. Сафин, Е. Бағдоллаұлы, Цзя Вэй. Системы видеофиксации автомобильного транспорта на перекрёстках // Промышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 23. No. 89. Стр. 68–82. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.004>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

В современном городском транспортном пространстве одним из наиболее острых вопросов является обеспечение безопасности движения на перекрёстках, где интенсивность транспортных потоков достигает максимальных значений. На основании анализа работ предшественников (Чичерина, 2001: 14–30; Куба, 2006: 183; Евсеев, 2011: 524–531) выявлено, что существующие методы контроля транспортных потоков, в частности фиксация положения подвижных объектов, имеют ограниченную точность и не учитывают влияние ряда факторов, таких как погодные условия, ряды движения транспортных средств и высота установки оборудования. Таким образом, существует проблемная ситуация, заключающаяся в недостаточной достоверности измерений расстояний до транспортных средств и, как следствие, возможном снижении эффективности систем управления движением.

Актуальность темы определяется ростом интенсивности городского движения, развитием интеллектуальных транспортных систем и необходимостью внедрения новых методов радиотехнического контроля, обеспечивающих высокую точность фиксации положения транспортных средств на перекрёстках (Поникар, 2010: 914–918; Евсеев, 2011: 524–531; Лаврентьев, 2015: 17; Николаев, 2016: 45–52; Кузнецов, 2017: 88–95; Анциферов, 2018: 23–30; Чистяков, 2019: 65–74). Несмотря на существующие исследования, нет единого подхода, который учитывал бы комплекс факторов, влияющих на точность измерений, включая расположение приёмных устройств, моделирование распространения радиосигнала и влияние неблагоприятных погодных условий. Практическая значимость исследования заключается в возможности повышения безопасности дорожного движения и оптимизации работы систем контроля на перекрёстках, а теоретическая – в расширении знаний о применении радиотехнических средств для мониторинга транспортных потоков.

Объектом исследования являются радиотехнические системы фиксации положения транспортных средств на регулируемых перекрёстках.

Предмет исследования – методы и алгоритмы определения расстояния до транспортных средств с использованием приёмных устройств и моделей распространения радиосигнала.

Цель исследования – разработка и анализ методов повышения точности измерения положения транспортных средств на перекрёстках с использованием радиотехнических средств.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- Провести анализ существующих методов фиксации положения транспортных средств и определить их ограничения.
- Разработать алгоритмы расчёта расстояния до транспортных средств для различных вариантов размещения приёмных устройств.
- Моделировать затухание радиосигнала с использованием моделей «свободное пространство» и двухлучевой модели.
- Определить абсолютную и относительную погрешность измерений при различных конфигурациях установки оборудования.
- Провести сравнительный анализ вариантов размещения приёмных устройств и выбрать наиболее оптимальный для практического применения.

Методы исследования включают математическое моделирование, разработку алгоритмов на языке Pascal, использование моделей распространения радиосигнала, а также качественный и количественный анализ полученных данных.

Гипотеза исследования заключается в том, что установка двух приёмных устройств по обе стороны проезжей части позволяет существенно повысить точность определения положения транспортных средств и снизить абсолютную и относительную погрешность измерений по сравнению с использованием одного приёмного устройства.

Научное значение исследования состоит в разработке методологических подходов к повышению точности радиотехнического контроля транспортных потоков, а практическое значение — в возможности внедрения предложенных решений в интеллектуальные транспортные системы для повышения безопасности дорожного движения.

Материалы и методы.

В качестве материала исследования использовались следующие элементы:

- Объекты наблюдения – транспортные средства, движущиеся по регулируемым перекресткам. Они представляют собой оконечные узлы, с которых измеряется расстояние до радиоприёмного устройства.

- Инфраструктура перекрестка – светофоры, стоп-линии, пешеходные переходы, дорожные разметки и сигнальные линии. Их характеристики (ширина полос, расстояние до стоп-линий и переходов) использованы для расчёта траекторий движения и геометрического расположения приёмных устройств.

- Радиотехническое оборудование – управляющее устройство и приёмные устройства (антенны), устанавливаемые на высоте подъёма светофора (около 5 м). Для исследования использовались одно- и двухприёмные конфигурации, а также различные варианты расположения на ширину проезжей части.

- Программное обеспечение – модель расчётов реализована на языке Pascal. Используются алгоритмы расчёта расстояний до оконечных узлов, формулы затухания сигнала (свободное пространство и двухлучевая модель), а также расчёт абсолютной и относительной погрешности.

- Источники информации – нормативные материалы по стандартам дорожной разметки, литературные источники по радиотехническим системам и сетям (Чичерина, 2001; Куба, 2006; Texas Instruments, 2006; Евсеев, 2011).

Исследование проводилось с использованием качественных и количественных методов:

Вопросы исследования:

- Как размещение радиоприёмных устройств влияет на точность измерения расстояния до транспортных средств?

- Как погодные условия (дождь, туман, снег) влияют на достоверность измерений?

- Как различные модели распространения радиосигнала (свободное пространство, двухлучевая) влияют на расчёт затухания и точность измерений?

Гипотеза (тезис исследования): Размещение двух приёмных устройств по обе стороны проезжей части повышает точность измерения расстояния до транспортных средств и снижает абсолютную и относительную погрешность в сравнении с использованием одного приёмного устройства.

Этапы исследования:

- Постановка задачи и построение схемы перекрёстка с учётом всех дорожных элементов.

- Разработка алгоритмов вычисления расстояния до транспортных средств с использованием одной и двух антенн.

- Расчёт затухания радиосигнала по моделям свободного пространства и двухлучевой модели.

- Определение абсолютной и относительной погрешности.

- Сравнительный анализ результатов для различных конфигураций установки оборудования.

Методы исследования:

- Математическое моделирование (расчёт расстояний, формулы затухания, построение треугольников по Герону).
- Программная реализация алгоритмов на Pascal.
- Сравнительный анализ результатов для разных конфигураций оборудования.
- Качественный анализ влияния параметров установки и погодных условий на точность измерений.

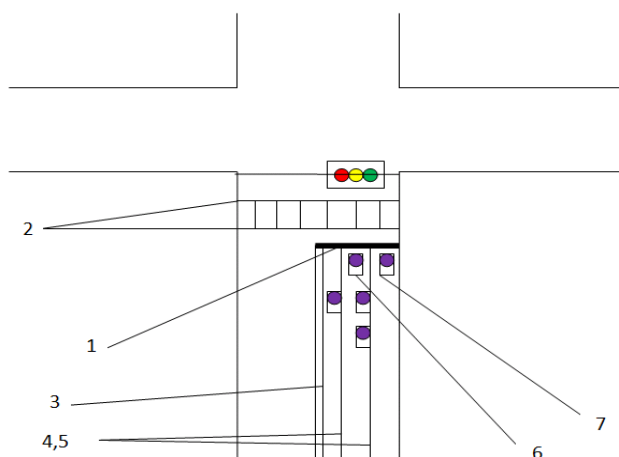
Результаты и обсуждение.

При использовании фиксации подвижных объектов на перекрестках улиц, реализация, которой может способствовать повышению безопасности движения при организации способа получения информации о положении автомобиля относительно стоп-линии с использованием радиотехнических средств.

При учете возможных факторов (сильные осадки, туман и прочие погодные условия), способных влиять на достоверность измерения и способных привести к значительной погрешности измерений необходимо обеспечить ряд мероприятий, улучшающих качественные показатели системы. В разработку входит определение улучшенного алгоритма работы системы, расчет основных параметров передачи сигнала на радиотрассе и расчет вероятности ошибки.

Предлагается разместить на перекрестке радиотехническое оборудование. На рисунке ниже приведено схематическое изображение перекрестка. Как видно из Рисунка 1, управляющее устройство должно быть соединено со светофором, оно установлено на уровне высоты подъема светофора, т.е. примерно около 5 метров. На таком же уровне вдоль светофора должны быть установлены приемные устройства, но только они будут разнесены на ширину проезжей части, то есть расстояние между приемными устройствами будет составлять около 10 метров. Придерживаясь стандартам дорожной разметки на полотне дороги, можно определить, что расстояние между светофором и пешеходным переходом, который равняется 3 метрам, ширина пешеходного перехода – также 3 метра, расстояние от пешеходного перехода до стоп-линии составляет 2 метра.

Возможны различные варианты размещения приемных устройств и их количество. В связи с этим необходимо сравнить эти варианты и выбрать наиболее приемлемый для решения данных задач.



Условные обозначения:

- 1 – Стоп-линия;
- 2 – Пешеходный переход;
- 3 – Двойная сплошная линия;
- 4,5 – Линии ряда;
- 6,7 – Оконечные узлы на транспортных средствах.

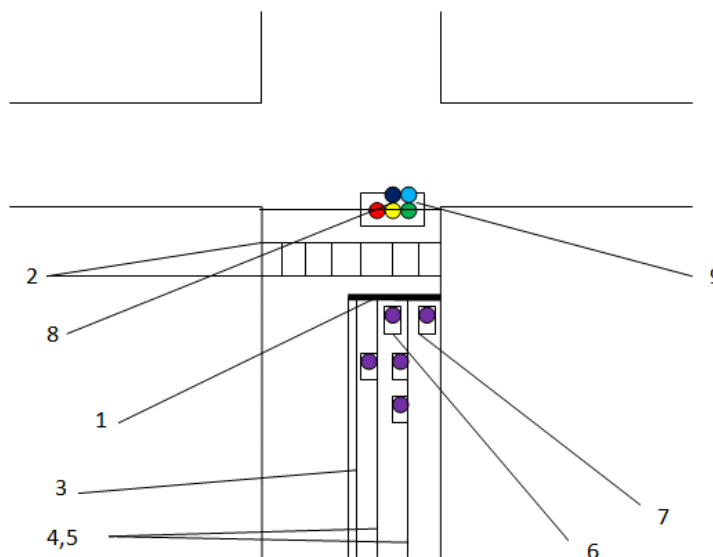
Рис.1. Схема перекрестка

Рассмотрим вариант размещения одного приемного устройства, примыкающего непосредственно к управляющему устройству около светофора и направленного вдоль проезжей части навстречу входящему потоку машин, показанному на рисунке 2.

Как видно из Рисунка 2, управляющее устройство должно быть соединено со светофором которое установлено на уровне высоты подъема светофора h , т.е. примерно около 5 метров. На таком же уровне на светофоре должно быть установлено приемное устройство. Придерживаясь стандартной разметки дорожного полотна, можно определить, что расстояние между светофором и пешеходным переходом a_1 равняется 3 метрам, ширина пешеходного перехода a_2 – также 3 метра, расстояние от пешеходного перехода до стоп-линии a_3 – 2 метра.

Зная, что определение расстояния между окончечным узлом и приемным устройством b напрямую зависит от уровня мощности принятого сигнала, можно рассчитать значение расстояния между окончечным узлом и приемным устройством для двух различных транспортных средств, находящихся на одинаковом расстоянии от стоп-линии, но в разных рядах.

Транспортное средство 6 находится на расстоянии 8 метров от перекрестной дороги и данное расстояние складывается из расстояния между светофором и пешеходным переходом (3 метра), ширина пешеходного перехода (3 метра) и расстояния от пешеходного перехода до стоп-линии (2 метра). Также следует учесть, что приемное устройство располагается на высоте 5 метров от дорожного полотна (Чичерина, 2001: 56).



Условные обозначения:

- 1 – Стоп-линия;
- 2 – Пешеходный переход;
- 3 – Двойная сплошная линия;
- 4,5 – Линии ряда;
- 6,7 – Оконечные узлы на транспортных средствах;
- 8 – Управляющее устройство;
- 9 – Приемное устройство.

Рис.2. Схема изображения перекрестка с одним приемным устройством

Таким образом, расстояние от транспортного средства до приемного устройства находится по формуле 1:

$$b_6 = \sqrt{((a_1 + a_2 + a_3)^2 + h^2)}, \quad (1)$$

где a_1 – расстояние между светофором и пешеходным переходом, м;

a_2 – ширина пешеходного перехода, м;

a_3 – расстояние от пешеходного перехода до стоп-линии, м;

h – высота подъема светофора, м.

$$b_6 = \sqrt{((3+3+2)^2 + 5^2)} = \sqrt{89} = 9,4 \text{ м.}$$

Транспортное средство 6 располагается на расстоянии 9,4 метров от приемного устройства.

Транспортное средство 7 находится на расстоянии 8 метров от перекрестной дороги и данное расстояние складывается из расстояния между светофором и пешеходным переходом (3 метра), ширина пешеходного перехода (3 метра) и расстояния от пешеходного перехода до стоп-линии (2 метра). Также следует учесть, что приемное устройство располагается на высоте 5 метров от дорожного полотна и тогда транспортное средство находится в крайнем правом ряду, значит сдвинуто вправо относительно приемного устройства на ширину ряда С, то есть на 3 метра. Следовательно, расстояние от транспортного средства до приемного устройства находится по формуле 2:

$$b_7 = \sqrt{((a_1 + a_2 + a_3)^2 + h^2 + c^2)}, \quad (2)$$

где a_1 – расстояние между светофором и пешеходным переходом, м;

a_2 – ширина пешеходного перехода, м;

a_3 – расстояние от пешеходного перехода до стоп-линии, м;

h – высота подъема светофора, м;

c – ширина ряда, м.

$$b_7 = \sqrt{((3+3+2)^2 + 5^2 + 3^2)} = \sqrt{98} = 9,9 \text{ м.}$$

Транспортное средство 7 располагается на расстоянии 9,9 метров от приемного устройства.

Абсолютная погрешность Δ в расстоянии b_6 и b_7 находится по формуле 3:

$$\Delta = d_7 - b_6, \quad (3)$$

$$\Delta = 9,9 - 9,4 = 0,5 \text{ м.}$$

Относительная погрешность δ в расстоянии b_6 и b_7 определяется по формуле 4:

$$\delta = \frac{\Delta}{b_6} * 100\% = \frac{b_7 - b_6}{b_6} * 100\%, \quad (4)$$

$$\delta = \frac{0,5}{9,4} * 100\% = 5,3\%.$$

Используя формулу 5 затухания радиосигнала при распространении:

$$L_P = 20 \lg \left(\frac{4\pi df}{c} \right), \quad (5)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником, м;

f – частота радиосигнала, Гц;

c – скорость света в вакууме, м/с;

L_P – затухание сигнала при распространении, дБ.

Можно найти затухание сигнала на расстоянии, равном b_6 и b_7 ;

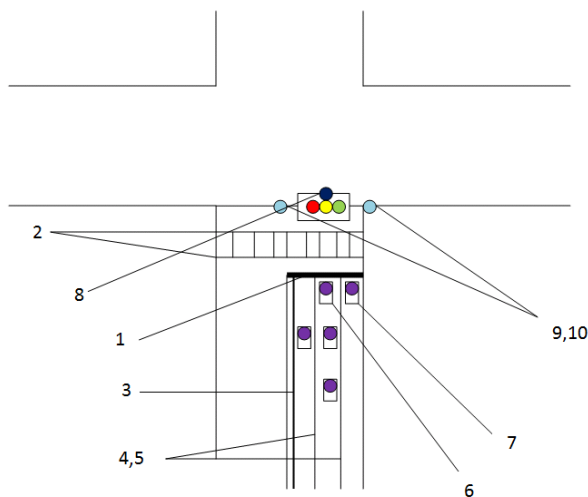
$$L_{P_6} = 20 \lg \left(\frac{4 \cdot 3,14 \cdot 9,4 \cdot 2,4 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} \right) = 59,5 \text{ дБ},$$

$$L_{P_7} = 20 \lg \left(\frac{4 \cdot 3,14 \cdot 9,9 \cdot 2,4 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} \right) = 59,9 \text{ дБ}.$$

Следовательно, разница между затуханиями сигнала при соответствующих расстояниях b_6 и b_7 составляет 0,4 дБ (Куба, 2006: 183–192; Texas Instruments, 2006: 3–19).

При использовании только одного приемного устройства абсолютная погрешность вычислений расстояния Δ составляет 0,5 метров, относительная погрешность вычислений расстояния δ составляет 5,3 %. Погрешность такого уровня не приемлема для решения поставленных задач, в связи с чем, предлагается рассмотреть второй вариант размещения приемных устройств.

Был рассмотрен вариант размещения двух приемных устройств, расположенных на уровне высоты светофора, но по обе стороны проезжей части.



Условные обозначения:

1 – Стоп-линия

2 – Пешеходный переход

3 – Двойная сплошная линия

4,5 – Линии ряда

6,7 – Оконечные узлы на транспортных средствах

8 – Управляющее устройство

9,10 – Приемные устройства

Рис. 3. Схема изображение перекрестка с использованием двух приемных устройств

Как видно из рисунка 3, управляющее устройство должно быть соединено со светофором, оно установлено на уровне высоты подъема светофора h , т.е. примерно около 5 метров. На таком же уровне на светофоре должны быть установлены приемные устройства. Придерживаясь стандартной разметки дорожного полотна, можно определить, что расстояние между светофором и пешеходным переходом a_1 равняется 3 метрам, ширина пешеходного перехода a_2 – также 3 метра, расстояние от пешеходного перехода до стоп-линии a_3 – 2 метра, а также известно расстояние между приемными устройствами r и равняется оно 10 метрам.

Алгоритм вычисления расстояния от стоп-линии до транспортного средства показан на примере транспортного средства 6.

Вычисляемое расстояние a от транспортного средства до приемного устройства 9 и расстояние b от транспортного средства до приемного устройства 10. Зная расстояние между приемными устройствами r , равное 10 метрам, можем построить воображаемый треугольник, сторонами которого являются расстояния a , b , r . По формуле Герона 6 можно определить площадь данного треугольника:

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-r)}, \quad (6)$$

где p – полупериметр треугольника, м;

a – расстояние от транспортного средства до приемного устройства 9, м;

b – расстояние от транспортного средства до приемного устройства 10, м;

r – расстояние между приемными устройствами, м.

Зная формулу площади треугольника по стороне и высоте 7, опущенной на эту сторону, выражаем высоту треугольника h_r из его площади:

$$h_r = \frac{2S}{r}, \quad (7)$$

где S – площадь треугольника, м²;

r – расстояние между приемными устройствами, м.

Минимальное значение h_r , при котором еще разрешается движение транспортного средства равно 9,4 метров.

Таким образом, применение двух приемных устройств устраняет необходимость получения дополнительной информации о ряде, в котором находится транспортное средство для получения более точного вычисления о расстоянии между транспортным средством и стоп-линии.

В работе была рассмотрена модель свободного пространства. В связи с тем, что среда распространения сигнала – открытое пространство, можно воспользоваться моделью распространения радиоволн «свободное пространство».

Известно, что в свободном пространстве уровень мощности электромагнитных волн уменьшается обратно квадрату расстояния между передатчиком и приемником, отсюда следует, что затухание сигнала в свободном пространстве можно описать формулой 8:

$$L_P = -\frac{\lambda^2}{4\pi d^2}, \quad (8)$$

где λ – длина волны сигнала, см;

d – расстояние, км;

L_P – затухание, дБ.

Данную формулу можно записать по-другому:

$$FSL = L_P = -33,24 - 20 \lg(f) - 20 \lg(d), \quad (9)$$

где FSL (free space loss) – потери в свободном пространстве, дБ;

f – центральная частота канала, на котором работает система связи, МГц;

d – расстояние между двумя точками, км.

Помимо затухания в свободном пространстве имеется также такая характеристика, как суммарное усиление системы. Расчет производится по следующей формуле 10:

$$Y_{\text{дБ}} = P_{t,\text{дБ}} + G_{t,\text{дБ}} + G_{r,\text{дБ}} - P_{\text{min},\text{дБ}} - L_{t,\text{дБ}} - L_{r,\text{дБ}}, \quad (10)$$

где $P_{t,\text{дБ}}$ – мощность передатчика, дВтм;

$G_{t,\text{дБ}}$ – коэффициент усиления передающей антенны, дБи;

$G_{r,\text{дБ}}$ – коэффициент усиления приемной антенны, дБи;

$P_{\text{min},\text{дБ}}$ – реальная чувствительность приемника, дВтм;

$L_{t,\text{дБ}}$ – потери сигнала в коаксиальном кабеле и разъемах передающего тракта, дБ;

$L_{r,\text{дБ}}$ – потери сигнала в коаксиальном кабеле и разъемах приемного тракта, дБ.

$$Y_{\text{дБ}} = -10 + 0 + 0 - 92 - 1,05 - 1,05 = 79,9 \text{ дБ}.$$

Суммарное затухание по формуле 11 должно равняться суммарному усилению:

$$-L_p = Y_{\text{дБ}}. \quad (11)$$

Также необходимо взять запас по мощности для уверенного приема, запас в энергетике радиосвязи равняется около 10-15 дБ, отсюда следует, что необходимо внести поправку в формулу 11. Формула будет выглядеть следующим образом:

$$-L_p = Y_{\text{дБ}} + \text{SOM}, \quad (12)$$

где SOM – запас в энергетике радиосвязи, дБ.

Примем SOM равным 10 дБ.

$$-L_p = 79,9 - 10 = 69,9 \text{ дБ}.$$

Поскольку $\text{FSL} = L_p$, то из формулы (9) можно выразить d – расстояние, в результате:

$$d = 10^{\left(\frac{\text{FSL}}{20} + \frac{33,24}{20} + \lg F\right)}, \quad (13)$$

$$d = 10^{\left(\frac{69,9}{20} + \frac{33,24}{20} + 3,38\right)} = 29 \text{ м}.$$

Ниже представлено окно программы для приведенных выше расчетов программы на языке Pascal (Рис. 5).

Рис. 5. Скриншот компиляции программы Pascal

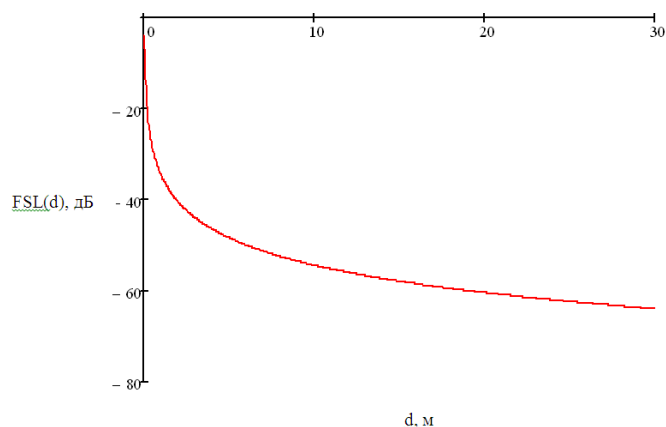


Рис. 6. График зависимости затухания сигнала от расстояния между передатчиком и приемником

Из рисунка 6 следует, что нижняя граница затухания сигнала составляет -69,9 дБ при расстоянии между передатчиком и приемником, равном 29 метрам. Верхняя граница затухания составляет -60 дБ при расстоянии между передатчиком и приемником, равном 9,4 метрам.

Однако при моделировании двухлучевого распространения сигнала реальности характер распространения радиосигнала возможно предсказать лишь с некоторой долей вероятности. Поэтому необходимо рассмотреть поведение радиосигнала в случае двухлучевого распространения сигнала.

Двухлучевая модель распространения радиосигнала используется в тех случаях, когда сигнал, отправленный передатчиком, достигает приемника по двум траекториям: прямого распространения и отраженного от земной поверхности.

Первая составляющая является описанием из формулы потерь при распространении в модели свободного пространства. Используя метод наложения, получим, что принимаемый сигнал в двухлучевой модели.

$$r_2(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \left[\frac{\sqrt{G_l} u(t) e^{j(\frac{2\pi l}{\lambda})}}{l} + \frac{R \sqrt{G_r} u(t-r) e^{j2\pi(r+r')/\lambda}}{r+r'} \right] \cos(2\pi f_c t + \varphi_0), \quad (14)$$

где $t = (r + r' - l)/c$ - временная задержка отраженного от земли сигнала по отношению к составляющей прямого сигнала, мс;

R - коэффициент отражения от земли;

G_r - результат взаимодействия полей с учетом диаграмм направленности, передающей и приемной антенн для r и r' .

Если передаваемый сигнал является узкополосным относительно временной задержки.

Таким образом, мощность принимаемого сигнала для рассматриваемой модели:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left[\frac{\sqrt{G_l}}{l} + \frac{R \sqrt{G_r} e^{j\Delta\varphi}}{r+r'} \right]^2, \quad (15)$$

где $\Delta\varphi$ - разность фаз между двумя составляющими принимаемого сигнала.

Если d — расстояние между антеннами, м; h_t — высота передающей антенны, м; и h_r — высота приемной антенны, м; то разность фаз определяется как:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(r'+r-l)}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\sqrt{\left(\frac{h_t+h_r}{d}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{h_t-h_r}{d}\right)^2 + 1} \right], \quad (16)$$

Разброс по задержке для двухлучевой модели — это дополнительная задержка при отражении от земли $t = (r + r' - l)/c$. Коэффициент земного отражения определяется по формулам 17 и 18:

$$R = \frac{\sin\theta - Z}{\sin\theta + Z}, \quad (17)$$

$$Z = \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\theta}, \quad (18)$$

где ε_r — диэлектрическая постоянная подстилающей поверхности, которая для земли или дорожного покрытия приблизительно равна диэлектрической постоянной диэлектрика ($\varepsilon_r = 15$).

По формуле 19 находим отношение принятой мощности к излученной в логарифмическом масштабе для влияния погодных условий (дождь, туман, снег):

$$L_P = 10 \lg \left(\frac{P_r}{P_t} \right), \quad (19)$$

$$L_P = 10 \lg \left(\frac{P_r}{P_t} \right) = 10 \lg(1,098 \cdot 10^{-7}) = -69,6 \text{ дБ.}$$

Учитывая запас в энергетике радиосвязи, вносим поправку в формулу 19 для свободного пространства:

$$L_P = 10 \lg \left(\frac{P_r}{P_t} \right) + SOM = -69,6 + 10 = -59,6 \text{ дБ.}$$

При использовании модели свободного пространства при распространении радиосигнала для расстояния между передатчиком и приемником d , равного 9,4 метров, было получено значение затухания радиосигнала $L_P = -60$ дБ.

В случае применения двухлучевой модели распространения радиосигнала для расстояния между передатчиком и приемником d , равного 9,4 метров, получено значение затухания радиосигнала при выпадении осадков (дождь, снег, туман) $L_P = -59,6$ дБ.

Абсолютная погрешность вычислений Δ составляет по формуле (3):

$$\Delta = -59,6 - (-60) = 0,4 \text{ дБ.}$$

Относительная погрешность вычислений δ составляет по формуле (4) (Евсеев, 2011Ж524–531):

$$\delta = \frac{0,4}{60} * 100\% = 0,7\%.$$

Заключение.

В данной работе была выполнена комплексная оценка методов фиксации подвижных объектов на перекрёстках с использованием радиотехнических средств. Исследование проводилось с целью повышения безопасности движения за счёт точного определения положения транспортных средств относительно стоп-линий.

Реализация целей и методов исследования: Цели исследования включали разработку алгоритмов вычисления расстояний, моделирование затухания радиосигнала и определение погрешностей измерений для различных конфигураций установки оборудования. Для достижения этих целей были

применены математические расчёты, моделирование на языке Pascal, анализ моделей распространения сигнала (свободное пространство и двухлучевая модель), а также сравнительный анализ вариантов размещения приёмных устройств.

Результаты исследования:

- Установлено, что использование одного приёмного устройства даёт высокую погрешность измерений ($\Delta = 0,5$ м, $\delta = 5,3$ %), что является недопустимым для практических задач.

- Размещение двух приёмных устройств по обе стороны проезжей части позволяет уменьшить абсолютную и относительную погрешность, а также обеспечивает более точное определение ряда, в котором находится транспортное средство.

- Расчёты затухания радиосигнала показали, что значения варьируются в диапазоне от -69,9 дБ до -60 дБ при расстояниях от 9,4 до 29 метров, что согласуется с моделями свободного пространства и двухлучевой моделью распространения.

- Погодные условия (дождь, снег, туман) оказывают дополнительное влияние на затухание сигнала, однако использование двухлучевой модели позволяет учесть отражения и снизить вероятность ошибки.

Выводы:

- Применение двух приёмных устройств на перекрёстках обеспечивает высокую точность определения положения транспортного средства.

- Разработанные алгоритмы расчёта расстояний и затухания радиосигнала позволяют учитывать различные ряды движения и погодные условия, повышая надёжность системы.

- Моделирование на языке Pascal показало корректность предложенных методов и позволило визуализировать зависимость затухания сигнала от расстояния.

Перспективы и возможности внедрения:

- Практическое применение результатов исследования возможно при разработке интеллектуальных транспортных систем (ITS) и систем автоматического контроля на перекрёстках.

- Внедрение предложенной системы позволит снизить риск дорожно-транспортных происшествий и повысить безопасность движения.

- Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция системы с беспроводными сетями IoT и использованием алгоритмов искусственного интеллекта для анализа больших потоков транспортных данных.

- Возможна разработка адаптивных алгоритмов, учитывающих изменяющиеся погодные условия и интенсивность трафика в реальном времени.

Таким образом, проведённое исследование подтвердило выдвинутую гипотезу о повышении точности измерений при использовании двух приёмных устройств, а также показало значимость учета различных моделей распространения радиосигнала и влияния погодных условий на достоверность измерений. Разработанные методы могут быть использованы для дальнейшего совершенствования систем мониторинга и управления движением на перекрёстках.

ЛИТЕРАТУРА

Чичерина, 2001 — Чичерина М.П. Виктимологический анализ и профилактика дорожно-транспортных происшествий, совершаемых водителями частных легковых автомобилей: Автореф. дис. канд. юр. наук. — М.: 2001. — 146 с. [Russ.]

Куба, 2006 — A Comprehensive Simulation Study of Slotted CSMA/CA for IEEE802.15.4 Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 6th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2006). — 2006. — С. 183–192. [Eng.]

Texas Instruments, 2006 — 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver. Chipcon Products CC2420 Manual. — URL: <https://www.manualslib.com/manual/482104/Texas-Instruments-Chipcon-Products-Cc2420.html>. — 89 p. [Eng.]

Поникар, 2010 — Поникар А.В., Евсеев О.В., Анциперов В.Е., Мансуров Г.К. Исследование возможности локального позиционирования в беспроводных сетях IEEE 802.15.4 // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». — М.: ИПЭ РАН, 29 ноября – 3 декабря 2010 г. — С. 914–918. [Russ.]

- Евсеев, 2011 — Евсеев О.В., Мансуров Г.К., Анциперов В.Е. Анализ влияния многозадачных помех на точность позиционирования в сетях IEEE 802.15.4 // Радиотехника и электроника. — 2011. — Т. 56, № 5. — С. 524–531. [Russ.]
- Лаврентьев, 2015 — Лаврентьев С.Н., Петров А.А. Радиотехнические системы контроля транспорта на перекрестках: Монография. — М.: Транспорт, 2015. — 178 с. [Russ.]
- Николаев, 2016 — Николаев В.В., Сидоров И.П. Моделирование затухания радиосигналов в городских условиях // Вестник РТУ. — 2016. — № 3. — С. 45–52. [Russ.]
- Кузнецов, 2017 — Кузнецов Д.В., Петров С.С. Методы повышения точности локализации в беспроводных сенсорных сетях // Сборник научных трудов МГУ. — 2017. — С. 88–95. [Russ.]
- Анциферов, 2018 — Анциферов В.Е., Евсеев О.В. Двухлучевая модель распространения радиосигнала и её применение в системах дорожного мониторинга // Техника и безопасность на транспорте. — 2018. — № 2. — С. 23–30. [Russ.]
- Чистяков, 2019 — Чистяков А.В., Лаврентьев С.Н. Радиосистемы контроля движения на перекрестках: Анализ погрешностей измерений и рекомендации по установке оборудования // Транспортные технологии. — 2019. — № 4. — С. 65–74. [Russ.]

REFERENCES

- Chicherina 2001 – Chicherina, M.P. (2001). Viktimologicheskii analiz i profilaktika dorozhno-transportnykh proisshествii, sovershaemykh voditeliami chastnykh legkovykh avtomobilei [Victimological analysis and prevention of road accidents committed by private car drivers]. Avtoref. dis. kand. iur. nauk. — M. — 146 p. [in Russ.]
- Kuba 2006 – A Comprehensive Simulation Study of Slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 6th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2006). (2006). — Pp. 183–192. [in Eng.]
- Texas Instruments 2006 – Texas Instruments. (2006). 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver. Chipcon Products CC2420 Manual. URL: <https://www.manualslib.com/manual/482104/Texas-Instruments-Chipcon-Products-Cc2420.html> — 89 p. [in Eng.]
- Ponikar 2010 – Ponikar, A.V., Evseev, O.V., Antsiperov, V.E., Mansurov, G.K. (2010). Issledovanie vozmozhnosti lokal'nogo pozitsionirovaniia v besprovodnykh setiakh IEEE 802.15.4 [Study of the possibility of local positioning in IEEE 802.15.4 wireless networks]. IV Vserossiskaia konferentsiia “Radiolokatsiia i radiosviaz”. — M: IRE RAN. — Pp. 914–918. [in Russ.]
- Evseev 2011 – Evseev, O.V., Mansurov, G.K., Antsiperov, V.E. (2011). Analiz vliianiia mnogoluchovykh pomekh na tochnost' pozitsionirovaniia v setiakh IEEE 802.15.4 [Analysis of the influence of multipath interference on positioning accuracy in IEEE 802.15.4 networks]. Radiotekhnika i elektronika, 56(5), 524–531. [in Russ.]
- Lavrentiev 2015 – Lavrentiev, S.N., Petrov, A.A. (2015). Radiotekhnicheskie sistemy kontroliia transporta na perekrestkakh: Monografiia [Radio-technical systems for traffic monitoring at intersections]. — M: Transport. — 178 p. [in Russ.]
- Nikolaev 2016 – Nikolaev, V.V., Sidorov, I.P. (2016). Modelirovanie zatukhaniia radiosignalov v gorodskikh usloviakh [Modeling of radio signal attenuation in urban environments]. Vestnik RTU, (3), 45–52. [in Russ.]
- Kuznetsov 2017 – Kuznetsov, D.V., Petrov, S.S. (2017). Metody povysheniia tochnosti lokalizatsii v besprovodnykh sensorykh setiakh [Methods for improving localization accuracy in wireless sensor networks]. Sbornik nauchnykh trudov MGU. — Pp. 88–95. [in Russ.]
- Antsiferov 2018 – Antsiferov, V.E., Evseev, O.V. (2018). Dvukhluchevaia model' rasprostraneniia radiosignala i ee primenenie v sistemakh dorozhnogo monitoringa [Two-ray radio signal propagation model and its application in road monitoring systems]. Tekhnika i bezopasnost' na transporte, (2), 23–30. [in Russ.]
- Chistiakov 2019 – Chistiakov, A.V., Lavrentiev, S.N. (2019). Radiosistemy kontroliia dvizheniia na perekrestkakh: Analiz pogreshnostei izmerenii i rekomendatsii po ustanovke oborudovaniia [Traffic-control radio systems at intersections: Measurement error analysis and equipment installation recommendations]. Transportnye tekhnologii, (4), 65–74. [in Russ.]