

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОЙ ПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ

С. В. Оробченко, А. Д. Евсеев, А. А. Чугунов,
К. В. Кочка, А. П. Малышев

В настоящее время существуют три основные технологии взимания пошлины в режиме свободного потока: на базе аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем, на основе транспондеров с использованием сигналов выделенной связи ближнего действия или сигналов радиочастотной идентификации. Однако, такие технологии имеют ряд недостатков: глобальные навигационные спутниковые системы не способны в стандартном режиме обеспечить требуемую точность координатных определений полосы движения, система по технологии радиочастотной идентификации чувствительна к погодным условиям и имеет ограничения на скоростной режим, система выделенной связи ближнего действия не имеет отечественных аналогов транспондера и требует больших затрат на эксплуатацию. Отсюда следует потребность в использовании альтернативной системы, имеющей следующие свойства: относительно низкую стоимость разработки и эксплуатации; всепогодность использования; независимость от скорости транспортного средства. В статье предложена структура локальной позиционной системы, состоящей из двух опорных радионавигационных точек на базе сверхширокополосных сигналов. Синтезирован и апробирован алгоритм оценки полосы движения транспортного средства. Предложен алгоритм нелинейной аппроксимации косвенных наблюдений. Предложенная структура локальной позиционной системы, которая не чувствительна к погодным условиям, не имеет ограничений на скоростной режим транспортного средства, а также не требует больших затрат на разработку и эксплуатацию.

Ключевые слова: система Free flow, имитационная модель, беззапросная разностно-дальномерная локальная позиционная система, компьютерное моделирование.

Введение

На сегодняшний день в Российской Федерации активно вводится в эксплуатацию большое количество дорог или отдельные их участки, которые являются платными для проезда транспортных средств. Такое решение имеет ряд преимуществ по сравнению с бесплатными дорогами: более низкая плотность транспортного потока, высокая интенсивность движения, помощь, в случае необходимости, и получение дополнительного сервиса. С целью оперативной оплаты за проезд по платному участку дороги разработана система автоматического сбора пошлины (САСП), данная система представляет собой пропускные пункты, устанавливаемые у въезда на дорогу и у выезда с нее. Транспортное средство, проезжающее через пропускной пункт, должно быть оборудовано специальным радиопередатчиком, называемым транспондер. В настоящее время существуют три основные технологии взимания пошлины в режиме свободного потока: используя глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) – данные об использовании платных дорог формируются на основе привязки ГНСС-треков к дорожному графу, выделенной связи ближнего действия (*Dedicated Short-Range Communications* – DSRC), автоматической радиочастотной идентификации (*Radio Frequency IDentification* – RFID) с использованием транспондеров. Стоит отметить, что транс-

пондеры, используемые в системах DSRC и RFID, не изготавливаются в Российской Федерации. В таблице представлен сравнительный анализ параметров технологий, используемых для взимания пошлины. Таким образом, возникает необходимость в использовании системы, которая бы обладала низкой стоимостью разработки и эксплуатации, не была чувствительна к погодным условиям и не имела скоростного ограничения транспортного средства.

ГНСС не способны обеспечить требуемую точность координатных определений потребителя в стандартном режиме. Снижения погрешности можно достичь, используя дифференциальный режим, однако такой подход требует использования дополнительной, более дорогостоящей навигационной аппаратуры потребителя. Как следствие, необходимо использовать альтернативные системы, в качестве которых предлагаются локальные позиционные системы (ЛПС) [1 – 3]. ЛПС характеризуются необходимостью развертывания и поддержания инфраструктуры опорных радионавигационных точек (ОРНТ).

В настоящее время набирают популярность ЛПС, использующие сверхширокополосные сигналы (СШП) стандарта IEEE 802.15.4 [4 – 5]. Данный стандарт беспроводной связи характеризуется низким энергопотреблением аппаратуры. СШП данного стандарта являются импульсными с длительно-

Таблица

Сравнительный анализ параметров технологий, используемых для взимания пошлины

	ГНСС	DSRC	RFID	Ручной сбор	СШП
Необходимость бортового устройства	Да	Да	Да	Нет	Да
Стоимость разработки	Высокая	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
Стоимость эксплуатации	Средняя	Средняя	Низкая	Высокая	Низкая
Необходимость развертывания инфраструктуры	Нет	Да	Да	Да	Да
Скорость транспортного средства	Без ограничений	Высокая	Низкая	С остановкой	Высокая
Чувствительность к погодным условиям	Нет	Нет	Да	Нет	Нет

стью менее одной наносекунды и с шириной спектра от 500 МГц. Такие характеристики обеспечивают высокую разрешающую способность по времени, а также устойчивость к многолучевости и в связи с этим высокую точность измерения времени распространения радионавигационных сигналов между ОРНТ. Навигационные системы, которые построены на базе технологии СШП, обеспечивают погрешность определения координат объектов внутри рабочей зоны от нескольких сантиметров до метра в зависимости от конфигурации ОРНТ [6 – 7]. Различные ЛПС, использующие сверхширокополосные сигналы, отличаются способом передачи информации, измеряемыми радионавигационными параметрами, методом получения навигационных элементов и местом, где производятся вычисления (на стороне инфраструктуры или потребителя). С целью снижения энергопотребления транспондера была выбрана беззапросная разностно-дальномерная ЛПС с активным радиомодулем-транспондером, обмен информацией осуществляется только в одну сторону, как показано на рис. 1.

В качестве первичных радионавигационных параметров выступают разности задержек времени приема радиосигналов между транспондером и двумя разными ОРНТ, синхронизированными во времени, навигационным параметром является разность дальностей от транспондера до двух ОРНТ.

Как говорилось выше, САСП состоит из пропускных пунктов, которые можно разделить на пункты, требующие остановку транспортного средства и безбарьерной системы взимания платы на дорогах «Свободный поток» (*Free flow*), позволяющие проезжать трассу без остановок, увеличивая пропускную способность проезжей части. В данной работе будет рассматриваться система *Free flow*, пропускной пункт которой представляет собой две ОРНТ, расположенные по обе стороны дороги (рис. 2). Такое количество ОРНТ не позволит решать навигационную задачу, однако обеспечит возможность определения полосы движения потребителя.

Таким образом, данная работа посвящена созданию алгоритма оценки полосы движения транспортного средства, движущегося по платному участку дороги с пропускными пунктами типа *Free flow*. Пропускные пункты представляют собой локальную систему позиционирования, использующую сверхширокополосные сигналы и состоящую из двух опорных радионавигационных точек. С целью снижения энергопотребления транспондера была выбрана беззапросная разностно-дальномерная система позиционирования с активным радиомодулем-транспондером.

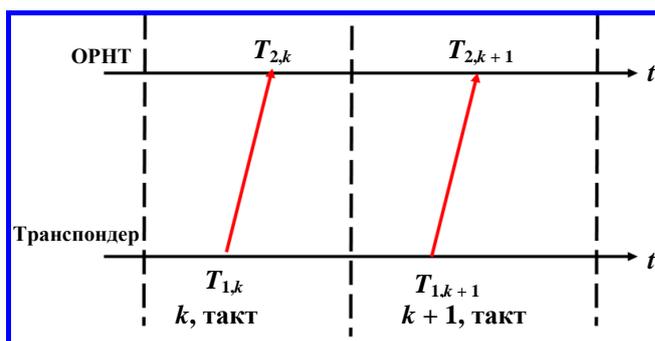


Рис. 1. Иллюстрация передачи радиосигналов в беззапросных локальных навигационных системах с использованием сверхширокополосных сигналов: T_1, T_2 – моменты времени в шкале транспондера и опорной радионавигационной точки; t – шкала времени; k – такт шкалы времени

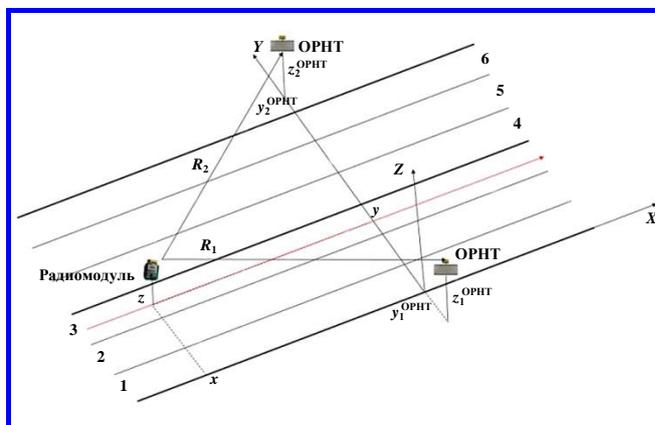


Рис. 2. Схема положения элементов предлагаемой локальной позиционной системы

Постановка задачи

Рассмотрим конфигурацию ЛПС (см. рис. 2), включающую в себя две ОРНТ с известными пространственными координатами $x_i^{\text{ОРНТ}} = (x_i^{\text{ОРНТ}}, y_i^{\text{ОРНТ}}, z_i^{\text{ОРНТ}})$, $i = 1, 2$ в локальной декартовой системе координат с единой шкалой времени системы (ШВС), которую обозначим $t^{\text{пр}}$. Описание всех временных процессов проводится в ШВС. Примем, что в рабочей зоне, описанной ЛПС на заданном интервале наблюдения $t^{\text{пр}} \in (t_0^{\text{пр}}, t_i^{\text{пр}})$, движется транспортное средство с постоянной скоростью, не меняя полосу движения. Транспондер закреплен на транспортном средстве на известной высоте. Также известно количество полос движения и их ширина. Положим, что в моменты времени $t_k^{\text{пр}}$ транспондер излучает радиосигналы, данные моменты времени обозначим как $t_{\text{изл},k}^{\text{пр}}$. Для моментов времени $t_{\text{изл},k}^{\text{пр}}$ в ШВС зададим значения времени, заранее неизвестное и обозначаемое как $T_{\text{изл},k}^{\text{пр}}$. Положим, что радиосигналы с транспондера излучаются с постоянным известным периодом, значение которого в ШВС обозначим как $T = T_{\text{изл},k}^{\text{пр}} - T_{\text{изл},k-1}^{\text{пр}}$.

Модель движения транспортного средства в ШВС записывается в виде:

$$\begin{cases} x_k = x_0 + V_x T_{\text{изл},k}^{\text{пр}}; \\ y_k = y; \\ z_k = z, \end{cases} \quad (1)$$

где V_x – проекция вектора скорости транспортного средства на ось абсцисс в заданной системе координат; x_0 – начальное значение координаты x в момент времени $t_0^{\text{пр}}$; y, z – координаты транспортного средства, которые остаются постоянными в ЛПС.

В момент времени $t_{\text{изл},k}^{\text{пр}}$ импульс достигнет i -й ОРНТ в момент времени $t_{i,k}^{\text{пр}}$. Значение времени приема $T_{i,k}^{\text{пр}}$ в ШВС записывается следующим соотношением:

$$T_{i,k}^{\text{пр}} = T_{\text{изл},k}^{\text{пр}} + \tau_{\text{распр},i,k} = T_{\text{изл},k}^{\text{пр}} + R_{i,k}/c, \quad (2)$$

где c – скорость света; $\tau_{\text{распр},i,k} = R_{i,k}/c$ – время распространения радиосигнала, излученного транспондером в момент времени $t_{\text{изл},k}^{\text{пр}}$, до i -й ОРНТ.

В приемниках, входящих в состав ОРНТ, момент фиксации приема радиосигнала, излученного транспондером в момент времени $t_{\text{изл},k}^{\text{пр}}$, формируется в результате обработки принятого радиосигнала в приемнике на фоне шумов приемника и, как следствие, момент фиксации радиосигнала отличается от фактического момента прихода радиосигнала $t_{i,k}^{\text{пр}}$. Обозначим этот момент приема как $\tilde{t}_{i,k}^{\text{пр}}$, а соответствующее ему значение времени в ШВС – как $\tilde{T}_{i,k}^{\text{пр}}$. Примем следующую модель для данного значения времени:

$$\tilde{T}_{i,k}^{\text{пр}} = T_{i,k}^{\text{пр}} + n_k = T_{\text{изл},k}^{\text{пр}} + R_{i,k}/c + n_k, \quad (3)$$

где n_k – независимый (по индексу i) аддитивный белый гауссовский шум с нулевыми математическими ожиданиями и заданной дисперсией σ_n^2 .

В теории оптимальной фильтрации их принято называть «наблюдениями» и обозначать буквой « Y ». Поэтому запишем (3) в виде:

$$Y_{i,k} \triangleq \tilde{T}_{i,k}^{\text{пр}}. \quad (4)$$

При использовании разностно-дальномерной архитектуры неизвестное слагаемое $T_{\text{изл},k}^{\text{пр}}$ возможно исключить за счет формирования косвенных наблюдений – разности дальностей. Примем, что разность дальностей формируется в момент времени $\tilde{t}_{i,k}^{\text{пр}}$.

Таким образом, по выборке наблюдений (4) на заданном временном интервале наблюдения $t^{\text{пр}}$ **требуется** оценить полосу движения транспортного средства.

Имитационное моделирование

Рассмотрим два способа определения полосы движения транспортного средства. В первом варианте задача решается в горизонтальной плоскости, где не учитывается высота ОРНТ и транспондера. Запишем общее выражение косвенных наблюдений – разности дальностей ΔR для трехмерного случая (5):

$$\Delta R = \sqrt{(x - x_1^{\text{ОРНТ}})^2 + (y - y_1^{\text{ОРНТ}})^2 + (z - z_1^{\text{ОРНТ}})^2} - \sqrt{(x - x_2^{\text{ОРНТ}})^2 + (y - y_2^{\text{ОРНТ}})^2 + (z - z_2^{\text{ОРНТ}})^2}. \quad (5)$$

С учетом заданной модели динамики транспортного средства (1) выражение (5) является нелинейной функцией информативного параметра y с выраженным экстремумом в момент времени проезда транспортным средством вертикальной плоскости, образуемой двумя ОРНТ, следовательно $x_1 = x_2 = x$. Для рассматриваемого случая выражение (5) преобразуется в следующий вид (при условии положительной определенности координаты y):

$$\Delta R = (y_1^{\text{ОРНТ}} - y) - (y - y_2^{\text{ОРНТ}}). \quad (6)$$

Преобразуя выражение (6) относительно y получим:

$$y = \frac{1}{2}(\Delta R + (y_2^{\text{ОРНТ}} - y_1^{\text{ОРНТ}})). \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет однозначно определить номер полосы движения транспортного средства для алгоритма, не учитывающего высоту закрепленного транспондера.

Во втором варианте задача решается с учетом высот транспондера и ОРНТ. Тогда выражение (5) преобразуется в следующий вид:

$$\Delta R = \sqrt{(y - y_1^{\text{ОРНТ}})^2 + (z - z_1^{\text{ОРНТ}})^2} - \sqrt{(y - y_2^{\text{ОРНТ}})^2 + (z - z_2^{\text{ОРНТ}})^2}. \quad (8)$$

Разность дальностей в выражении (8) нелинейно зависит от оцениваемого параметра y , поэтому получить выражение для координаты y относительно разности дальностей в явном виде невозможно. Для решения такой задачи применяется метод максимального правдоподобия [8]:

$$p(\Delta R | y) \rightarrow \max. \quad (9)$$

Для нахождения оценки максимального правдоподобия y необходимо решить уравнение следующего вида:

$$\left. \frac{d \ln(p(\Delta R | y))}{dy} \right|_{y = \hat{y}} = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) можно решить с помощью итерационного метода Ньютона. Нелинейная функция разности дальности линеаризуется в окрестности текущего значения оценки координаты \hat{y} . На рис. 3 представлена блок-схема синтезированного алгоритма.

В ходе имитационного моделирования была рассмотрена трасса, состоящая из 10-ти полос движения, ширина каждой полосы составляет 3,5 метра. Размер выборки составляет 500 реализаций, среднеквадратичное отклонение (СКО) шума наблюдений σ_n составляет 1 нс. На рис. 4 – 6 представлены результаты моделирования.

Анализ результатов имитационного моделирования показывает, что алгоритм, который не учитывает высоту транспондера, позволяет корректно определять полосу движения транспортного средства, однако возникают ошибки в оценке данного дискретного параметра в крайних полосах движения, следовательно, алгоритм не чувствителен к движению по полосам, ближайшим к ОРНТ. Алгоритм, основанный на оценке максимального правдоподобия и учитывающий высоту транспондера, обеспечивает достоверную оценку полосы движения транспортного средства во всех реализациях. Стоит отметить, что в случае движения потребителя не строго по центру полосы или же дисперсия наблюдаемой разности дальностей будет увеличена, синтезированный алгоритм даст ошибочную оценку координаты y , следовательно, номер полосы определится неверно. Для решения данной проблемы предлагается предварительно применить нелинейную аппроксимацию измерений разности дальностей. Для этого перезапишем модель косвенных наблюдений разности дальностей (5) с учетом (1) и поставим задачу оценки вектора $\mathbf{X} = [x_0 \ V_x \ y]^T$:

$$\Delta R(T_{\text{изл},k}^{\text{пр}}) = \sqrt{((x_0 + V_x T_{\text{изл},k}^{\text{пр}}) - x_1^{\text{ОРНТ}})^2 + (y - y_1^{\text{ОРНТ}})^2 + (z - z_1^{\text{ОРНТ}})^2} - \sqrt{((x_0 + V_x t_k) - x_2^{\text{ОРНТ}})^2 + (y - y_2^{\text{ОРНТ}})^2 + (z - z_2^{\text{ОРНТ}})^2}. \quad (11)$$

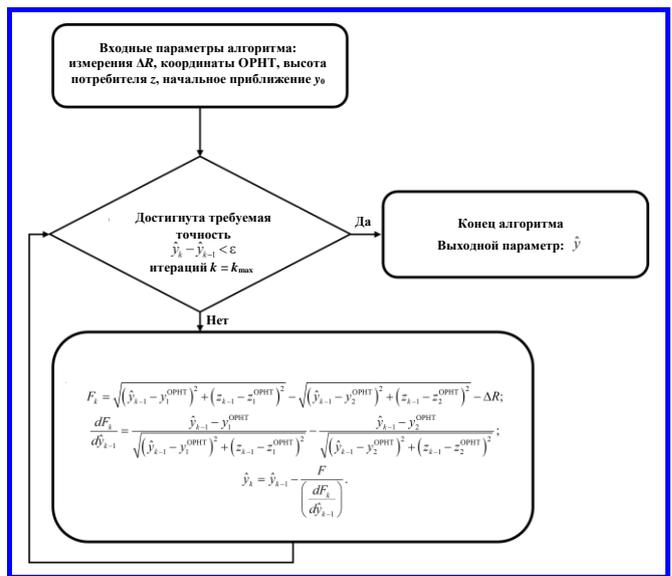


Рис. 3. Блок-схема метода Ньютона

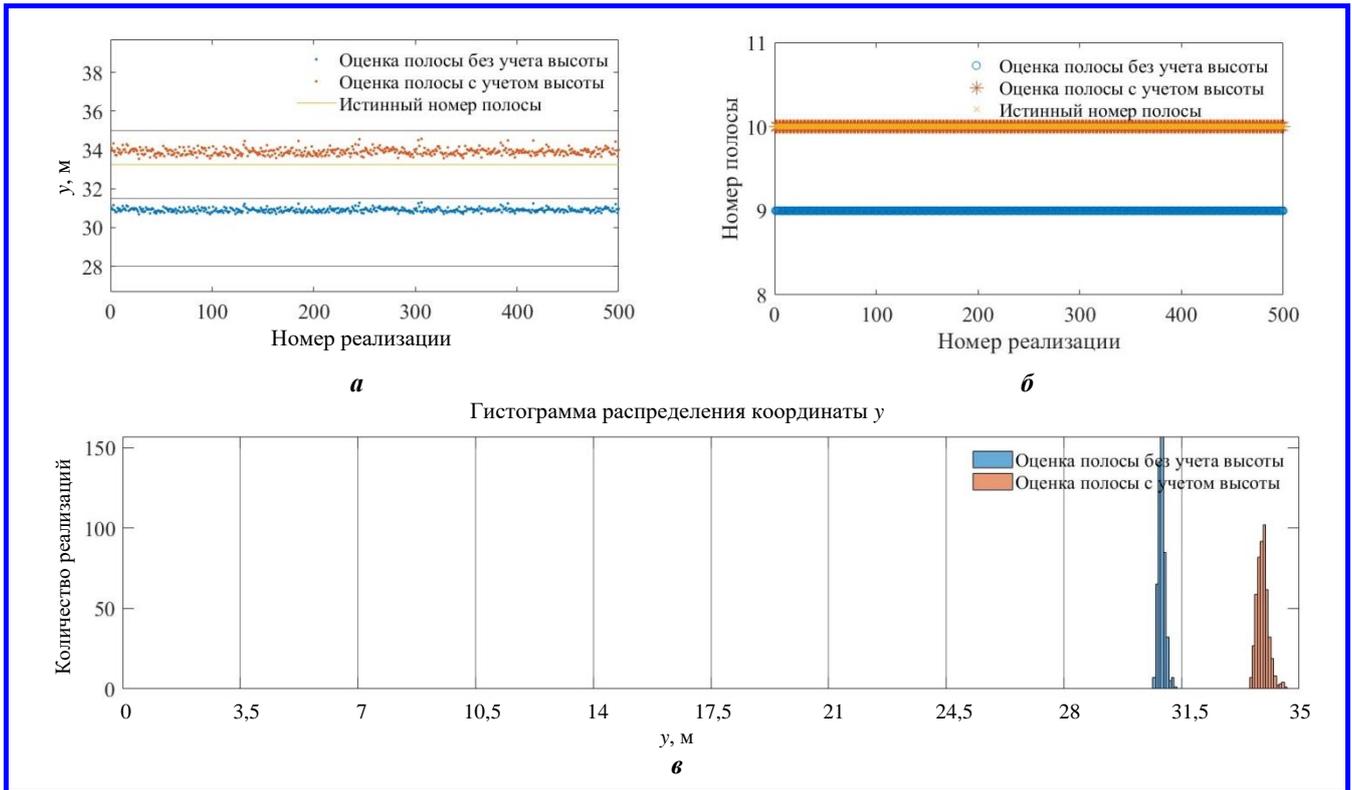


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования, движение транспортного средства по 10-й полосе: *a* – оценка координаты y ; *б* – оценка номера полосы; *в* – гистограмма распределения оценки координаты y

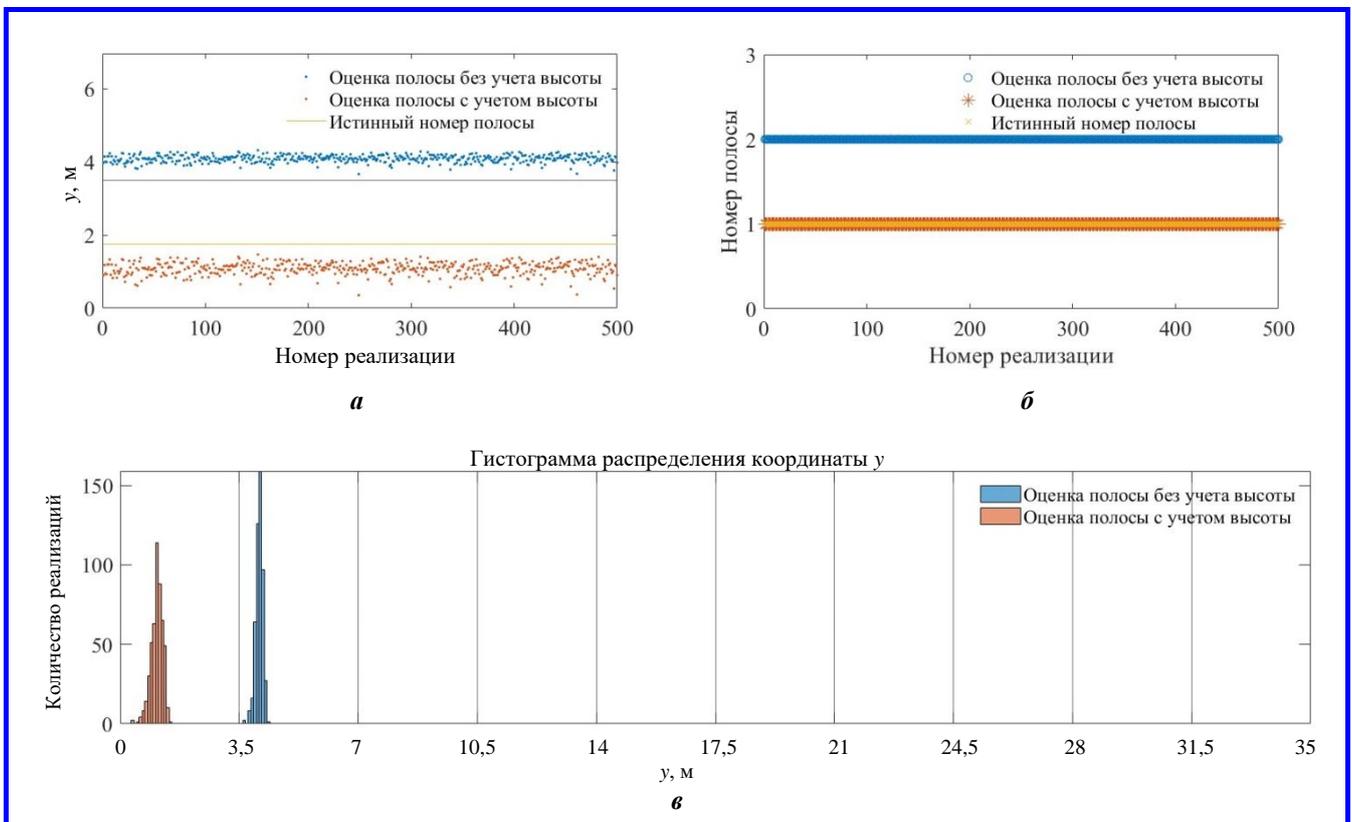


Рис. 5. Результаты имитационного моделирования, движение транспортного средства по 1-й полосе: *a* – оценка координаты y ; *б* – оценка номера полосы; *в* – гистограмма распределения оценки координаты y

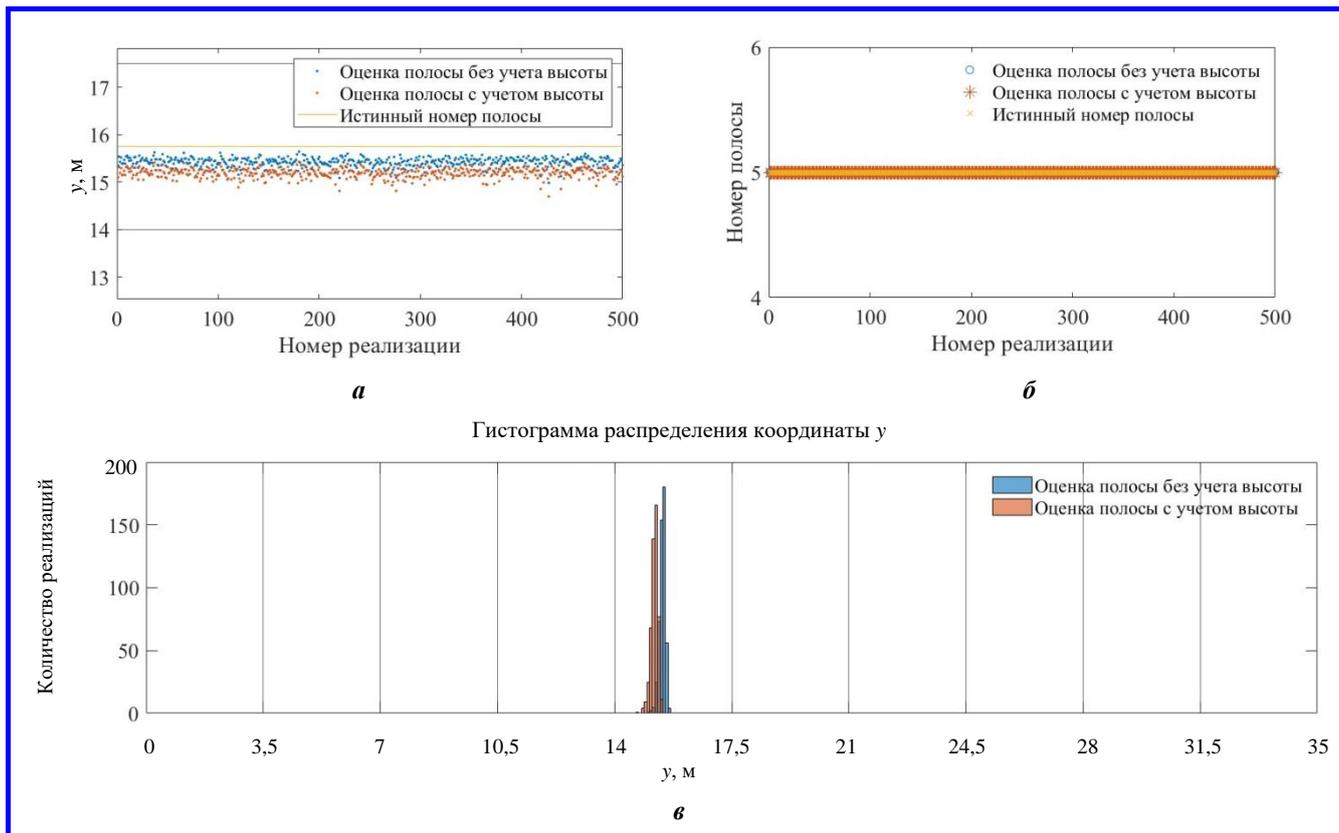


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования, движение транспортного средства по 5-й полосе: а – оценка координаты y; б – оценка номера полосы; в – гистограмма распределения координаты y

Оценка вектора состояния $\hat{\mathbf{X}}$ производится с помощью метода максимального правдоподобия. Для этого необходимо составить функцию потерь δ и минимизировать её:

$$\delta(\hat{\mathbf{X}}_k) = \sum_{k=0}^N \left(\frac{\sqrt{\left((\hat{x}_0 + \hat{V}_x T_{изл,k}^{пр}) - x_1^{ОРНТ} \right)^2 + (\hat{y} - y_1^{ОРНТ})^2 + (z - z_1^{ОРНТ})^2} - \sqrt{\left((\hat{x}_0 + \hat{V}_x T_{изл,k}^{пр}) - x_2^{ОРНТ} \right)^2 + (\hat{y} - y_2^{ОРНТ})^2 + (z - z_2^{ОРНТ})^2}}{-\Delta R(T_{изл,k}^{пр})} \right) \rightarrow \min \quad (12)$$

где N – количество измерений на интервале наблюдения $t^{пр}$.

Для определения экстремума функции потерь необходимо получить производную по всему вектору состояния \mathbf{X} и приравнять результат к нулю. Оценка вектора состояния будет находиться итеративным методом и записывается следующим выражением:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k-1} - \left[\frac{d}{d(\hat{\mathbf{X}}_{k-1})} \left(\frac{d\delta(\hat{\mathbf{X}}_{k-1})}{d(\hat{\mathbf{X}}_{k-1})} \right) \right]^{-1} \left(\frac{d\delta(\hat{\mathbf{X}}_{k-1})}{d(\hat{\mathbf{X}}_{k-1})} \right). \quad (13)$$

На рис. 7 представлен пример работы алгоритма нелинейной аппроксимации измеренной разности дальностей в ШВС.

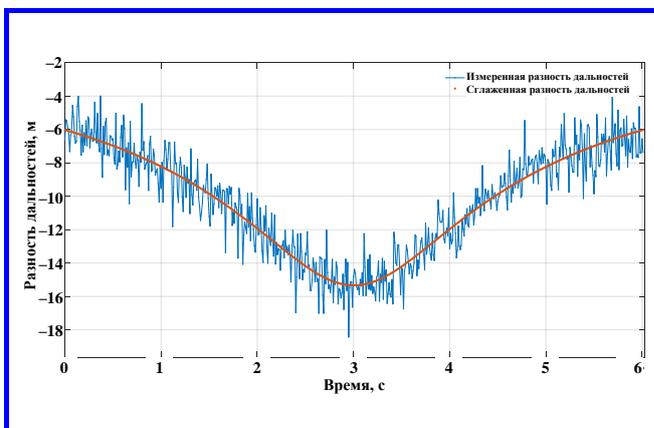


Рис. 7. Зависимости разности дальностей как функция времени

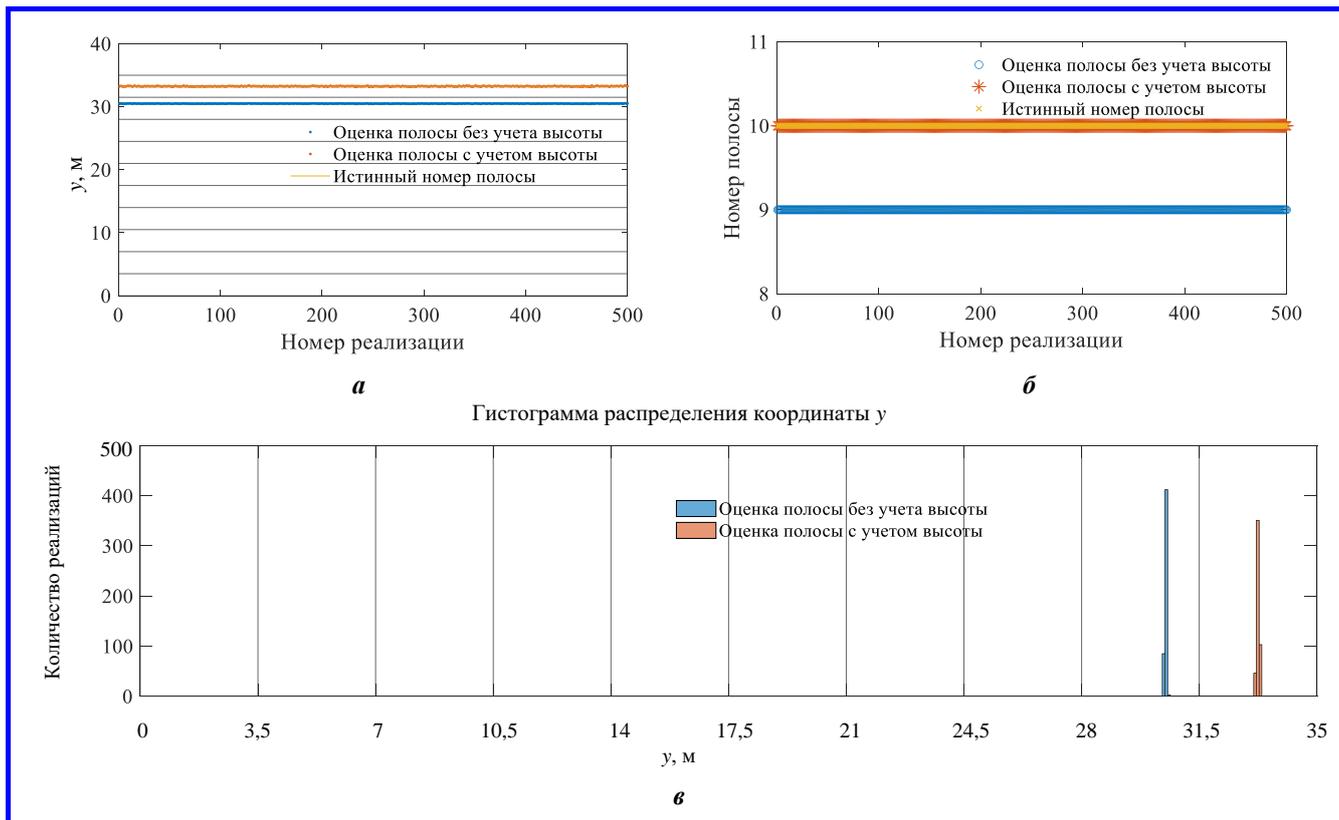


Рис. 8. Результаты имитационного моделирования для первично аппроксимированной разности дальностей, движение транспортного средства по 10-й полосе: *a* – оценка координаты y ; *б* – оценка номера полосы; *в* – гистограмма распределения координаты y

При неизменных начальных условиях проведем моделирование для первично аппроксимированной разности дальностей (рис. 8).

Анализируя рис. 8 заметим, что дисперсия оценки координаты \hat{y} значительно уменьшилась за счет нелинейной аппроксимации косвенных измерений $\Delta R(T_{изл,k}^{пр})$, что позволяет оценивать номер полосы с меньшей ошибкой.

Натурный эксперимент

Для валидации предложенного алгоритма оценки полосы движения транспортного средства был проведен натурный эксперимент (рис. 9).

Эксперимент заключался в следующем: проезжая часть представляет собой двухстороннее движение (по одной полосе в каждую сторону), транспортное средство двигалось в первой полосе движения. На интервале наблюдения автомобиль ехал с постоянной скоростью, транспондер находился на приборной панели. **Требовалось** оценить полосу движения.

Выбор начального приближения для алгоритма нелинейной аппроксимации измерений разностей дальностей производился на основании выборки

из гипотез о скорости автомобиля $V \in (-200, 200)$ км/ч с шагом 30 км/ч (множество V и шаг были подобраны на этапе имитационного моделирования). Начальное значение для координаты y было выбрано итерационным методом Ньютона (см. рис. 3), для координаты x_0 в соответствии с моделью движения транспортного средства (1) для момента времени, которое соответствует значению времени, когда автомобиль пересекает вертикальную плоскость, образованную двумя ОРНТ. Итоговое значение вектора начальных приближений $\mathbf{X}_0 = [x_0 \ V_x \ y]^T$ выбиралось как:

$$\mathbf{X}_0 = \arg \min_i (\|\Delta \hat{R}_i - \Delta \bar{R}\|), \tag{14}$$

где $\Delta \hat{R}$, $\Delta \bar{R}$ – оценка и измерения разности дальностей соответственно.



Рис. 9. Схема натурального эксперимента

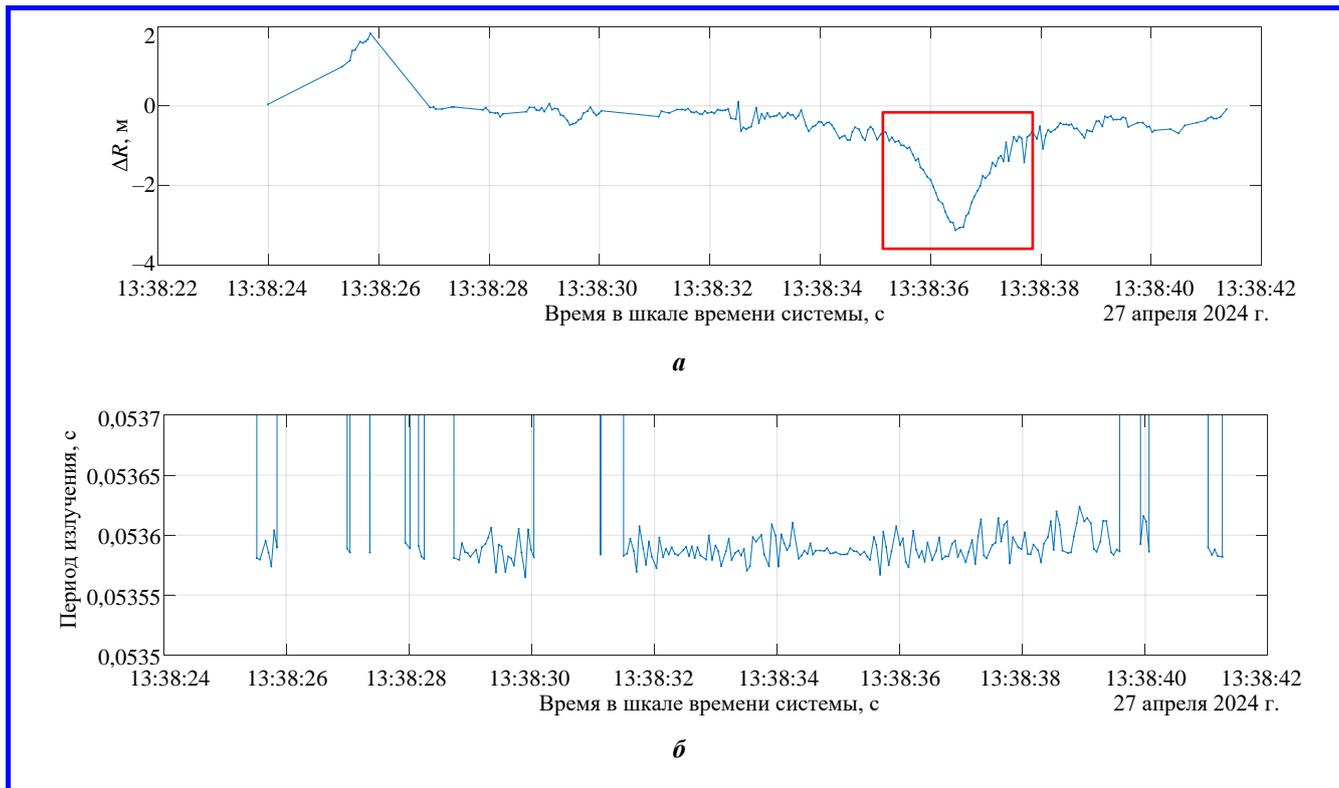


Рис. 10. Зависимость измеренной разности дальности от времени в шкале времени системы (а), зависимость периода излучения активного радиомодуля-транспондера как функции времени (б)

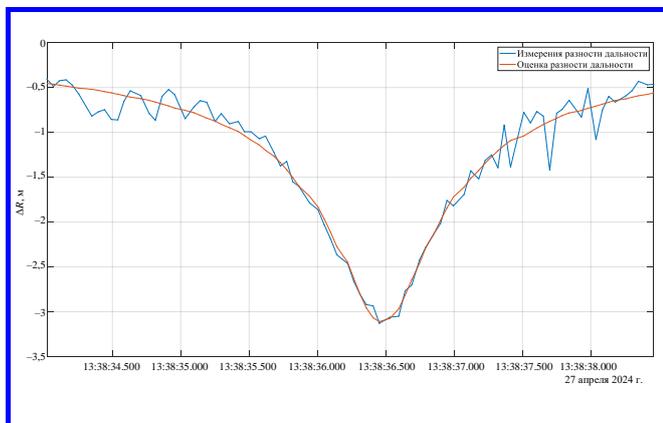


Рис. 11. Результат работы алгоритма нелинейной аппроксимации измерений разности дальностей

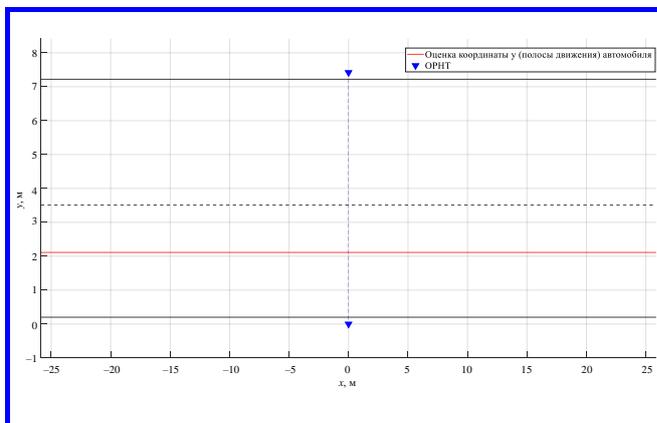


Рис. 12. Оценка полосы движения автомобиля

На рис. 10 показана зависимость измеренной разности дальности от времени в ШВС и зависимость периода излучения активного радиомодуля-транспондера как функции времени.

Заметим, что измеренная разность дальности имеет выраженный экстремум, который соответствует моменту времени, когда автомобиль пересекает вертикальную плоскость, образованную двумя ОРНТ (область, выделенная красным цветом на рис. 10).

На рис. 11 показан результат работы алгоритма нелинейной аппроксимации измерений разности

дальностей с подобранным вектором начальных приближений X_0 . Оценка полосы движения транспортного средства (координаты y) показана на рис. 12.

По результатам натурального эксперимента на интервале наблюдения СКО ошибки нелинейной аппроксимации разности дальности составило 14 см, что удовлетворяет требованиям задачи определения полосы движения. Предлагаемый в данной работе алгоритм дал верную оценку полосы движения транспортного средства.

Заключение

В данной работе были получены следующие результаты.

Для САСП типа *Free flow* предложена структура ЛПС из двух ОРНТ на базе СШП.

Для предлагаемой ЛПС разработан и апробирован в имитационном моделировании и натурном эксперименте алгоритм оценки полосы движения транспортного средства, а также предложен алгоритм нелинейной аппроксимации разности дальностей с целью уменьшения погрешности оценки полосы движения автомобиля.

Литература

1. Weighted Pseudo-Range Method of Positioning in Local Ultra-Wide Band Navigation Systems / R. Kulikov, A. Chugunov, V. Pudlovskiy [et al.]. – DOI : 10.1109/USBREIT.2019.8736586 // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Yekaterinburg, Russia. – 2019. – P. 387–390.
2. Chugunov, A. ToA Positioning Algorithm for TDoA System Architecture / A. Chugunov, N. Petukhov, R. Kulikov. – DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208169 // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia. – 2020. – P. 871–876.
3. INS/Wi-Fi based indoor navigation using adaptive Kalman filtering and vehicle constraints / W. Chai, C. Chen, E. Edwan [et al.]. – DOI : 10.1109/WPNC.2012.6268735 // 2012 9th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, Dresden, Germany. – 2012. – P. 36–41.
4. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.4: LowRate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) // IEEE Std 802154-2011 Revis. IEEE Std 802154-2006. – 2011. – P. 1–314.
5. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks // IEEE Std 802154-2020 Revis. IEEE Std 802154-2015. – 2020. – P. 1–800.
6. Experimental Evaluation of Positioning Efficiency in TDoA Navigation System Based on UWB / A. Chugunov, R. Kulikov, A. Malyshev [et al.]. – DOI : 10.1109/USBREIT56278.2022.9923331 // 2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Yekaterinburg, Russian Federation. – 2022. – P. 171–174.
7. Comparison of local ultra-wideband radio navigation systems architectures / I. V. Korogodin, A. P. Malyshev, A. A. Chugunov [et al.]. – DOI : 10.1109/REEPE53907.2022.9731398 // 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation. – 2022. – P. 1–6.
8. Перов, А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. Учебное пособие / А. И. Перов. – DOI : 10.18127/B9785931082240 // Радиотехника. – 2022. – 840 с.

Поступила в редакцию 25.03.2025

Степан Владимирович Оробченко, лаборант кафедры «Радиотехнических систем», т. +7 (918) 745-98-35, e-mail: orobchenkosv@mpei.ru.

Артем Денисович Евсеев, лаборант кафедры «Радиотехнических систем», т. +7 (999) 973-80-47, e-mail: yevseevad@mpei.ru.

Александр Андреевич Чузунов, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, т. +7 (906) 087-29-07, e-mail: chugunovaa@mpei.ru.

Кирилл Владимирович Кочка, лаборант кафедры «Радиотехнических систем», т. +7 (916) 499-97-21, e-mail: kochkakv@mpei.ru.

Александр Павлович Малышев, ассистент кафедры «Радиотехнических систем», т. +7 (915) 312-89-97, e-mail: MalyshevAP@mpei.ru.

SYNTHESIS OF THE ALGORITHM FOR ASSESSING VEHICLE LANE BASED ON A LOCAL POSITIONING SYSTEM USING ULTRA-WIDEBAND SIGNALS

S. V. Orobchenko, A. D. Evseev, A. A. Chugunov, K. V. Kochka, A. P. Malyshev

There are currently three main technologies for free-flow duty collection: based on the hardware of global navigation satellite system users, or using transponders with DSRC signals or RFID signals. However, there are a number of disadvantages to such technologies: global navigation satellite systems cannot provide the required accuracy of lane position definitions in standard mode, the system on RFID technology is sensitive to weather conditions and has limitations on speed, the DSRC system does not have domestic analog transponders and requires high operating costs. Hence the need for an alternative system with the following characteristics: relatively low cost of design and operation; all-weather use; independent of vehicle speed. The structure of a local positioning system consisting of two radio navigation points based on ultra-wideband signals was proposed in the paper. The algorithm of evaluation of vehicle traffic lane was synthesized and tested.

The algorithm of non-linear approximation of difference of distances is proposed. The proposed structure of a local positioning system is not sensitive to weather conditions, has no limitations on vehicle speed and does not require high development and operation costs.

Key words: free flow system, simulation model, TDoA, computer modeling.

References

1. Weighted Pseudo-Range Method of Positioning in Local Ultra-Wide Band Navigation Systems / R. Kulikov, A. Chugunov, V. Pudlovskiy [et al.]. – DOI : 10.1109/USBREIT.2019.8736586 // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Yekaterinburg, Russia. – 2019. – P. 387–390.
2. Chugunov, A. ToA Positioning Algorithm for TDoA System Architecture / A. Chugunov, N. Petukhov, R. Kulikov. – DOI : 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208169 // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia. – 2020. – P. 871–876.
3. INS/Wi-Fi based indoor navigation using adaptive Kalman filtering and vehicle constraints / W. Chai, C. Chen, E. Edwan [et al.]. – DOI : 10.1109/WPNC.2012.6268735 // 2012 9th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, Dresden, Germany. – 2012. – P. 36–41.
4. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.4: LowRate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) // IEEE Std 802154- 2011 Revis. IEEE Std 802154-2006. – 2011. – P. 1–314.
5. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks // IEEE Std 802154-2020 Revis. IEEE Std 802154-2015. – 2020. – P. 1–800.
6. Experimental Evaluation of Positioning Efficiency in TDoA Navigation System Based on UWB / A. Chugunov, R. Kulikov, A. Malyshev [et al.]. – DOI : 10.1109/USBREIT56278.2022.9923331 // 2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Yekaterinburg, Russian Federation. – 2022. – P. 171–174.
7. Comparison of local ultra-wideband radio navigation systems architectures / I. V. Korogodin, A. P. Malyshev, A. A. Chugunov [et al.]. – DOI : 10.1109/REEPE53907.2022.9731398 // 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation. – 2022. – P. 1–6.
8. Perov, A. I. Statistical Theory of Radio Engineering Systems. Study Guide / A. I. Perov. – DOI : 10.18127/B9785931082240 // Radiotekhnika. – 2022. – 840 c.

*Stepan Vladimirovich Orobchenko, laboratory assistant of the Department of Radio Engineering Systems,
t. +7 (918) 745-98-35, e-mail: orobchenkosv@mpei.ru.*

*Artyom Denisovich Evseev, laboratory assistant of the Department of Radio Engineering Systems,
t. +7 (999) 973-80-47, e-mail: yevseevad@mpei.ru.*

*Aleksander Andreevich Chugunov, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher,
t. +7 (906) 087-29-07, e-mail: chugunovaa@mpei.ru.*

*Kirill Vladimirovich Kochka, laboratory assistant of the Department of Radio Engineering Systems,
t. +7 (916) 499-97-21, e-mail: kochkakv@mpei.ru.*

*Aleksander Pavlovich Malyshev, assistant of Department of Radio Engineering Systems,
t. +7 (915) 312-89-97, e-mail: MalyshevAP@mpei.ru.*