

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АВТОНОМНОГО ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПОДВИЖНЫХ ЕДИНИЦ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ ТОКОВ

СОКОЛОВ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой¹;
e-mail: s.v.s.888@yandex.ru

ШВАЛОВ Дмитрий Викторович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой²;
e-mail: d_shvalov@mail.ru

¹Московский технический университет связи и информатики, Северо-Кавказский филиал, кафедра «Информатика и вычислительная техника», Ростов-на-Дону

²Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», Ростов-на-Дону

Приведен обзор известных решений по автономному позиционированию железнодорожных и нежелезнодорожных подвижных единиц. Рассмотрен метод автономного позиционирования, который позволяет с высокой точностью производить вычисление текущей координаты подвижной железнодорожной единицы в пределах участка железной дороги известной длины. Метод основан на анализе измеренных параметров тока, непрерывно протекающего по рельсам, — сигнального тока рельсовых цепей или кодового тока автоматической локомотивной сигнализации, являющегося физической основой реализации алгоритмов функционирования современных устройств обеспечения безопасности движения. Предложенный метод позволяет решать задачу позиционирования подвижных единиц на протяжении всего маршрута их следования по перегонам и станциям без использования спутниковых навигационных систем, что актуально в реальных условиях эксплуатации. Основными преимуществами данного метода позиционирования, помимо высокой точности, являются его простота, отсутствие необходимости установки дополнительной аппаратуры вдоль железнодорожного пути, а также отсутствие необходимости использования дополнительных сигналов в рельсовых цепях. Приведен численный пример, иллюстрирующий высокую точность определения координат подвижных железнодорожных единиц предложенным методом.

Ключевые слова: позиционирование поездов; организация движения поездов; железнодорожная подвижная единица; бортовой измерительно-вычислительный комплекс.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-201-209

▼ Введение

Современные тенденции в организации движения поездов, в частности, необходимость увеличения интенсивности движения за счет сокращения межпоездных интервалов [1], а также необходимость составления и реализации оптимальных с точки зрения энергозатрат графиков перевозочного процесса [2, 3] определяют постоянный рост требований к повышению точности позиционирования подвижных единиц на протяжении всего маршрута их следования по перегонам и станциям. Использование спутниковых навигационных систем (СНС) для высокоточного решения этой задачи не всегда возможно в реальных условиях эксплуатации в связи с:

- неработоспособностью СНС в туннелях, в условиях горного рельефа, при высоком уровне атмосферных помех, при многократных отражениях и т.п.;
 - необходимостью создания сложной сети дифференциальных поправок для повышения точности до требуемого уровня;
 - зависимостью точности СНС от конфигурации наблюдаемой спутниковой группировки и особенностей работы каждого спутника, а также влияния помех при прохождении спутниковых сигналов через тропосферу и ионосферу и динамики объекта.
- Подобные обстоятельства делают чрезвычайно актуальной проблему разработки автономных методов точного позиционирования

подвижных единиц железнодорожного транспорта, причем по возможности на основе использования уже существующих устройств железнодорожной инфраструктуры.

1. Обзор известных решений по автономному позиционированию подвижных единиц железнодорожного транспорта

В настоящее время на сети железных дорог наиболее распространенными безопасными и надежными устройствами позиционирования подвижных единиц являются рельсовые цепи [4, 5], каждая из которых обеспечивает контроль состояния («свободен» или «занят») участка пути конечной длины. Длины применяемых рельсовых цепей варьируются в зависимости от их типа и составляют от 100 до 2600 м. Для обеспечения безопасности движения поездов (подвижных единиц) в системах управления достаточно определять местоположение каждой подвижной единицы с точностью до занимаемого участка пути. Но для обеспечения минимально допустимых интервалов попутного следования необходима точность позиционирования, равная (и выше) точности, обеспечиваемой при использовании только валидных измерений СНС, причем в дифференциальном режиме (то есть в субметровом диапазоне).

В основе известных разработанных алгоритмов позиционирования железнодорожных подвижных единиц, не использующих спутниковые навигационные системы, и устройств, их реализующих, лежит анализ измеренных значений параметров тока, протекающего по рельсам и колесным парам подвижных единиц в процессе их движения.

Так, например, в известном устройстве для определения местоположения рельсового транспортного средства расстояние от точки подключения аппаратуры к рельсовой линии до подвижной единицы, шунтирующей рельсовую линию своими колесными парами, определяется по результатам измерения времени между излучением (подачей в рельсовую линию) и приемом зондирующего сигнала (пат. SU 1162653 А, В61L 25/02. Авторы: Ю. А. Бакулин (SU), Ю. А. Ерохин (SU); 21.11.83). Недостатками

данного устройства являются: необходимость формирования и передачи в рельсовую линию дополнительных сигналов; непосредственное подключение к рельсовой линии контрольно-измерительной аппаратуры, не входящей в состав рельсовой цепи.

Известно также устройство для контроля местоположения подвижного состава по результатам восприятия передаваемого с него сигнала (пат. SU 1219441 А, В61L 25/02. Авторы: О. П. Мерсон (SU), К. Г. Павлов (SU), В. Н. Лысач (SU) и И. И. Шитов (SU); 23.03.86). Серьезными недостатками данного устройства являются: необходимость формирования и передачи сигналов в дополнительно укладываемый вдоль пути шлейф; недостаточная точность определения местоположения подвижного состава (точность до зоны укладки (длины) шлейфа).

Можно еще отметить устройство для определения координаты подвижного объекта по результатам анализа параметров сигналов, наводимых в индуктивной линии (пат. SU 1252223 А1, В61L 3/20, G08C 21/00. Авторы: М. А. Шевандин (SU), А. В. Волков (SU) и А. В. Крупеник (SU); 23.08.86). Традиционными недостатками данного устройства являются: необходимость формирования и передачи сигналов в дополнительно укладываемую вдоль пути индуктивную линию; определение местоположения подвижного состава с точностью до зоны укладки (длины) индуктивной линии.

В завершение обзора следует также упомянуть устройство для определения расстояния между двумя подвижными единицами по результатам измерения времени прохождения сигналов по рельсовой линии (пат. SU 1137001 А, В61L 23/18. Автор: Ю. А. Ерохин (SU); 30.01.85). Недостатком данного устройства является необходимость формирования и передачи в рельсовую линию дополнительных сигналов.

На зарубежных железных дорогах наибольшее распространение получил способ позиционирования подвижных единиц на основе использования так называемых «бализ», установленных в определенных точках пути [6].

Сущность этого способа заключается в следующем:

- при помощи установленной на подвижной единице аппаратуры фиксируется прохождение «бализы»;
- рассчитывается пройденное от места установки «бализы» расстояние.

Основным недостатком такого способа является необходимость установки дополнительных устройств вдоль рельсовой линии.

В статье [7] описана методика определения координаты подвижной единицы на участке пути по изменению входного сопротивления рельсовой линии. Недостатком предложенной методики является наличие погрешности, составляющей до 10 % от длины рельсовой линии, что обусловлено необходимостью использования в расчетах точного значения сопротивления поездного шунта.

На станциях может быть применен предложенный в статье [8] способ позиционирования, основанный на использовании цифровой модели, которая представляет собой описание элементов путевого развития — путей, стрелок, изолированных участков, то есть объектов, координаты которых не изменяются в выбранной системе координат. На перегонах такой способ позиционирования неприменим в связи с отсутствием путевого развития.

2. Обзор известных решений по автономному позиционированию нежелезнодорожных подвижных единиц

В статье [9] рассмотрена реализация автономного позиционирования с использованием видеопозиционирования с привязкой к известным изображениям стационарных объектов, расположенных в зоне движения (для урбанизированной местности), и динамической радионавигации (для открытой и слабопересеченной местности). Недостатком видеопозиционирования является существенная зависимость качества обработки изображений от характеристик окружающей среды, что требует использования сложных многоступенчатых алгоритмов обработки изображений. Реализация радионавигации предполагает установку приемопередающих устройств как на подвижных единицах, так и в опорных точках с известными координатами.

Метод позиционирования с использованием магнитных датчиков, которые

устанавливаются на транспортных средствах и фиксируют электромагнитные поля с известными параметрами от стационарных объектов с известным местоположением, рассмотрен в монографии [10] и статье [11]. В [10] качестве таких объектов выбраны линии электропередачи (ЛЭП), проходящие вблизи или пересекающие траекторию движения транспортного средства. Ограничение для применения такого способа позиционирования железнодорожных подвижных единиц обусловлено расположением ЛЭП относительно железнодорожного пути: пересечение путей и ЛЭП энергосистемы страны встречается редко, а линии электрообеспечения объектов инфраструктуры расположены вдоль путей.

Акустическое позиционирование [12] позволяет определить взаимное расположение в пространстве рассредоточенных объектов на основании анализа совокупности параметров сигналов (время распространения сигналов между транспондерами), передаваемых с каждого объекта. Такой способ применим для группы объектов, находящихся на сравнительно небольших расстояниях друг от друга, и при отсутствии препятствий для распространения акустических сигналов.

Позиционирование подвижной единицы по радиосигналам от других объектов, описанное в статье [13], позволяет определить взаимное расположение нескольких подвижных объектов. Зависимость эффективности такого способа позиционирования от параметров среды распространения радиосигналов существенно ограничивает его использование на железнодорожном транспорте.

Предложенный в статье [14] способ позиционирования на основе оценки мощности (уровней) принимаемых сигналов пригоден только для неподвижных объектов.

3. Алгоритм автономного позиционирования подвижных единиц

Вышеперечисленные недостатки и ограничения по применению приведенных известных способов позиционирования подвижных единиц определяют в качестве одной из основных задач управления железнодорожным транспортом задачу его высокоточного *автономного*

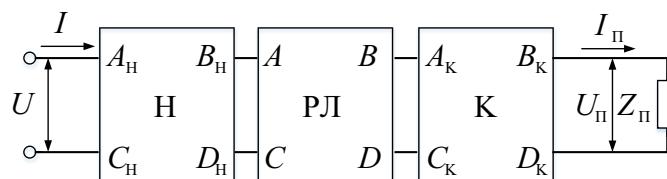


Рис. 1. Обобщенная схема замещения рельсовой цепи

позиционирования — то есть на основе использования только бортовой навигационной аппаратуры и соответствующего математического обеспечения.

В статье предлагается метод решения задачи автономного позиционирования железнодорожных подвижных единиц, основанный на бесконтактном измерении параметров рабочих сигналов рельсовых цепей с использованием бортовой измерительной аппаратуры. В процессе решения принимаем, что значения первичных параметров рельсовых линий, а также всех параметров других элементов рельсовых цепей не изменяются в пределах всего участка, на котором осуществляется позиционирование.

Рассмотрим математическую модель тока, протекающего по рельсам. Основными элементами рельсовой цепи являются источник питания и путевой приемник, подключенные к рельсовой линии. Принцип действия рельсовой цепи состоит в следующем. При свободном контролируемом участке пути ток от источника питания протекает по рельсовой линии к путевому приемнику. Приемник фиксирует свободное состояние участка (отсутствие на участке подвижных единиц). В процессе шунтирования рельсовой линии колесными парами подвижного состава наблюдается существенное снижение амплитуды входного сигнала путевого приемника, что приводит к регистрации занятого состояния контролируемого участка. Функционирование рельсовых цепей в непрерывном режиме обеспечивает постоянное протекание тока по рельсовой линии при корректной работе передающего оборудования и элементов сигнального тракта.

Напряжение U_x и сила тока I_x в любой точке рельсовой линии (на расстоянии x от конца) описываются уравнениями:

$$U_x = U_k \operatorname{ch} \gamma x + I_k Z_B \operatorname{sh} \gamma x,$$

$$I_x = \frac{U_k}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma x + I_k \operatorname{ch} \gamma x,$$

где γ — коэффициент распространения линии (комплексная величина);

Z_B — волновое сопротивление линии (комплексная величина).

Обобщенная типовая схема замещения рельсовой цепи [4] представляет собой последовательное соединение трех четырехполюсников (рис. 1): Н — замещающего аппаратуру входного (относительно источника питания) конца; РЛ — замещающего рельсовую линию; К — замещающего аппаратуру выходного (относительно источника питания) конца.

В схеме (рис. 1) использованы следующие обозначения: U и I — напряжение и сила тока источника питания рельсовой цепи; A_H, B_H, C_H, D_H — коэффициенты четырехполюсника Н; A, B, C, D — коэффициенты четырехполюсника, замещающего рельсовую линию; A_K, B_K, C_K, D_K — коэффициенты четырехполюсника К; U_{Π}, I_{Π} — напряжение и сила тока на входе путевого приемника; Z_{Π} — эквивалентное входное сопротивление путевого приемника.

Напряжения и токи источника питания и на входе путевого приемника связаны выражением:

$$I = C_0 U_{\Pi} + D_0 I_{\Pi},$$

где A_0, B_0, C_0 и D_0 — коэффициенты общего четырехполюсника тракта передачи сигнального тока.

При движении подвижной единицы вдоль рельсовой линии через ее колесные пары (по пути «первый рельс — колесо — ось — колесо — второй рельс») протекает ток, сила которого определяется выражением [4]:

$$I = \frac{U}{|Z_{\Pi}|}, \quad (1)$$

где U — выходное напряжение источника тока рельсовой цепи;

$|Z_{\Pi}|$ — модуль сопротивления передачи рельсовой линии.

Сопротивление передачи рельсовой линии определяется как [4]:

$$Z_{\Pi} = K'_{\text{TH}} [A \cdot R_{\text{ш}} + B + (C \cdot R_{\text{ш}} + D) Z'_{\text{ВХН}}], \quad (2)$$

где K'_{TH} — обратный коэффициент снижения тока в четырехполюснике Н (см. рис. 1),

$K'_{\text{TH}} = A_{\text{H}}$;

$Z'_{\text{ВХН}}$ — обратное входное сопротивление

четырехполюсника Н, $Z'_{\text{ВХН}} = \frac{B_{\text{H}}}{A_{\text{H}}}$;

$R_{\text{ш}}$ — сопротивление поездного шунта.

Коэффициенты A , B , C , D определяются известными выражениями:

$$A = D = \text{ch } \gamma l; \quad C = \frac{\text{sh } \gamma l}{Z_{\hat{A}}}; \quad B = Z_{\hat{A}} \text{sh } \gamma l,$$

где l — длина рельсовой линии.

Для последующего решения задачи позиционирования подставим в (1) выражения для составляющих формулы (2), одновременно заменив l на x (x — расстояние от колесной пары до конца рельсовой линии длины l , расположенной под известным азимутальным углом A относительно местного меридиана и имеющей известные координаты X_{K} , Y_{K} конца рельсовой линии в двумерной декартовой системе координат). В результате данной подстановки получим выражение для амплитудного значения силы тока I :

$$I = \frac{U}{|K_1 \cdot \text{ch } \gamma x + K_2 \cdot \text{sh } \gamma x|}, \quad (3)$$

где $K_1 = A_{\text{H}} \cdot R_{\text{ш}} + B_{\text{H}}$; $K_2 = Z_{\text{В}} \cdot A_{\text{H}} + \frac{R_{\text{ш}} \cdot B_{\text{H}}}{Z_{\text{В}} \cdot A_{\text{H}}}$.

Учитывая комплексный характер величин K_1 , K_2 и γ ($\gamma = \alpha + j\beta$), запишем выражение (3) как

$$I = \frac{U}{|(K_{1a} + jK_{1b}) \text{ch}(\alpha + j\beta)x + (K_{2a} + jK_{2b}) \text{sh}(\alpha + j\beta)x|}.$$

В этом случае сила тока, протекающего через колесную пару, определяется выражением:

$$I = \frac{2U}{\sqrt{pe^{2\alpha x} + qe^{-2\alpha x} + s \cdot \cos(2\beta x) + r \cdot \sin(2\beta x)}},$$

где $p = (K_{1a} + K_{2a})^2 + (K_{1b} + K_{2b})^2$;

$q = (K_{1a} - K_{2a})^2 + (K_{1b} - K_{2b})^2$;

$s = 2[(K_{1a}^2 - K_{2a}^2) + (K_{1b}^2 - K_{2b}^2)]$,

или

$$I = \frac{2U}{\sqrt{pe^{2\alpha x} + qe^{-2\alpha x} + w \cdot \sin(2\beta x + v)}}, \quad (4)$$

где $w = \sqrt{s^2 + r^2}$; $v = \tan^{-1} \frac{s}{r}$.

Нелинейное уравнение (4) решается с использованием известных итеративных методов, например путем предварительного умножения обеих частей выражения на знаменатель с последующим возведением в квадрат и использованием метода Ньютона — Рафсона [15]:

$$pe^{2\alpha x} + qe^{-2\alpha x} + w \cdot \sin(2\beta x + v) - \frac{4U^2}{I^2} = 0. \quad (5)$$

Так как начальное значение x известно точно ($x = l$), то данный алгоритм сходится за 2–4 шага (см. пример), что обеспечивает определение координаты x практически в реальном времени. После определения значения x рассчитываются текущие проекции расстояния колесной пары от конца рельсовой линии на оси двумерной декартовой системы координат по формулам:

$$x_t = x \cdot \sin A, \quad y_t = x \cdot \cos A,$$

и окончательно — текущие координаты колесной пары подвижной единицы в двумерной декартовой системе координат по формулам:

$$X_t = X_{\text{K}} - x \cdot \sin A, \quad Y_t = Y_{\text{K}} - x \cdot \cos A.$$

При прохождении колесной парой конца рельсовой линии, определяемого по

измеренному значению известной амплитуды тока, текущие координаты полагаются равными $X_t = X_K$, $Y_t = Y_K$, что обнуляет возможные ошибки определения текущих координат колесной пары в конце каждой рельсовой линии и наряду с приведенным выше определением ее текущих координат обеспечивает точное позиционирование подвижной единицы в пределах участка железнодорожного пути известной (конечной) длины.

4. Структура бортового измерительно-вычислительного комплекса автономного позиционирования подвижных единиц

Вариант структурной схемы бортового измерительно-вычислительного комплекса (БИВК), осуществляющего автономное позиционирование подвижной единицы, показан на рис. 2. Практическая реализация компонентов такого комплекса может быть осуществлена на базе типовых локомотивных устройств безопасности, широко применяющихся на сети железных дорог.

БИВК обеспечивает бесконтактное измерение параметров сигнала с оси колесной пары. Конструктивно система включает три основных блока, размещенных внутри корпуса подвижной единицы:

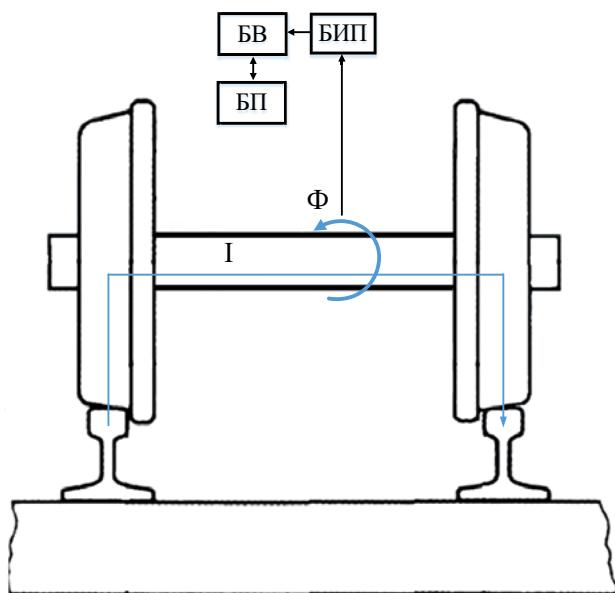


Рис. 2. Структурная схема бортового измерительно-вычислительного комплекса автономного позиционирования подвижных единиц

- измерительно-преобразовательный блок (БИП);
- вычислительный блок (БВ);
- блок памяти (БП), содержащий электронную карту маршрута.

В свою очередь, в состав блока БИП входят индуктивный датчик, полосовой фильтр, настроенный на частоту тока рельсовой цепи или автоматической локомотивной сигнализации, интегратор и аналого-цифровой преобразователь.

Работа БИВК организована следующим образом. Переменный ток, протекающий по оси колесной пары, создает переменное магнитное поле, магнитный поток которого определяется как $\Phi(t) = LI(x)\sin\omega t$, где L — известный масштабный коэффициент, определяемый величиной индуктивности цепи протекания тока; ω — частота тока рельсовой цепи. Данное магнитное поле наводит в катушке

индуктивности датчика ЭДС $\varepsilon = -k \frac{d\Phi(t)}{dt}$, где

k — известный масштабный коэффициент, определяемый параметрами катушки индуктивности датчика. После необходимых преобразований в блоке БИП (полосовая фильтрация, интегрирование и аналого-цифровое преобразование) сигнал, пропорциональный текущему значению $\Phi(t)$, поступает в вычислительный блок, где относительно переменной x в реальном масштабе времени решается нелинейное уравнение (5).

При реализации измерительно-вычислительного комплекса по любому из двух рассмотренных вариантов информация о контролируемых участках пути (длина рельсовой линии, координаты ее конца X_K , Y_K и азимутальный угол A наклона рельсового пути), размещенная в виде электронной карты в блоке памяти, перед началом движения считывается в вычислительный блок. Вычислительный блок также обращается к блоку памяти для получения необходимых данных об азимутальном угле A , длине рельсовой линии и координатах X_K , Y_K ее конца в случае перезапуска.

5. Пример

Для иллюстрации возможности эффективного использования предложенного метода

Таблица 1

№ итерации	x_n	$f(x_n)$	$f'(x_n)$	$ f(x_n) $	$ x_{n+1} - x_n $
0	1,9	-189 395,3199620799641943	$1,79850692241005929798 \cdot 10^6$	189 395,31996208	—
1	2,0053069730242038	10 220,2498283339846092	$1,9958671867855493643 \cdot 10^6$	10 220,24982833	0,105306973024204
2	2,00018626664854849	25,7675789641212683	$1,9858112018576206966 \cdot 10^6$	25,76757896	0,005120706375655
3	2,0001732908032415	0,0001649228215724	$1,9857857816222007647 \cdot 10^6$	0,00016492	0,000012975845307

автономного позиционирования рассмотрим следующий пример.

Для рельсовой цепи длиной $l = 2,5$ км с параметрами [4] $z_p = 0,5e^{j52^\circ}$ Ом, $\gamma = 0,745e^{j26^\circ}$ 1/км, $z_b = 0,67e^{j26^\circ}$ Ом, $A_H = 34,776e^{-j16^\circ 57'}$, $B_H = 9,38e^{j3^\circ 38'}$, $U = 150$ В при $R_{ш} = 0,03$ Ом, коэффициенты K_1 и K_2 из выражения (3) имеют значения

$$K_1 = -8,6201 - j3,4139,$$

$$K_2 = -21,6748 + j8,5382,$$

а коэффициенты уравнения (5) принимают следующие значения:

$$s = 965,7138; r = 590,3829; v = 58,56;$$

$$w = 1131,8812; p = 303\,197,8054; q = 160\,164,0878;$$

$$\alpha = 0,4819; \beta = 0,5681.$$

Уравнение вида (5)

$$303\,197,8 \exp(0,9638x) + 160\,164,1 \exp(-0,9638x) + 1131,9 \sin(1,1362x + 58,56) - (90\,000 : l^2) = 0$$

решалось относительно текущей координаты подвижной единицы x при различных значениях l методом Ньютона — Рафсона в программной среде *Mathforyou.net*¹. Значения x определялись с шагом 0,1 км с точностью $\varepsilon = 0,001$. В качестве начального приближения на текущем временном шаге использовалось значение координаты x , полученное на предыдущем временном шаге. На всем интервале моделирования сходимость к истинному решению с точностью до 1 м обеспечивалась за 3 итерации (табл. 1) при использовании в качестве останова вычислений как приращения ($|x_{n+1} - x_n| < \varepsilon$), так и отличия функции от нуля ($|f(x_n)| < \varepsilon$), что иллюстрирует высокую точность позицио-

Таблица 2

x , км (фактическое)	l , А	x , км (рассчитанное)	Погрешность, м
0	0,4402	0	0
0,1	0,4329	0,0998	0,2
0,5	0,3904	0,5001	0,1
1,0	0,3242	1,0004	0,4
1,5	0,2607	1,5001	0,1
2,0	0,2067	2,0001	0,1
2,5	0,1630	2,5000	0

нирования с использованием предложенного подхода и возможность его реализации в реальном масштабе времени. Фактические и рассчитанные значения x для рассматриваемого примера приведены в табл. 2.

Заключение

Предложенный метод автономного позиционирования характеризуется субметровой точностью определения координат подвижной единицы в пределах железнодорожного участка известной длины, оборудованного рельсовыми цепями любого типа. Принцип работы базируется на анализе параметров тока рельсовой цепи, который является фундаментальной основой функционирования современных систем обеспечения безопасности движения. Основными преимуществами данного метода позиционирования, помимо высокой точности, являются его простота, отсутствие необходимости установки дополнительной аппаратуры вдоль железнодорожного пути, а также использования в рельсовых цепях дополнительных сигналов. Для практической реализации метода необходимо предусмотреть механизмы автоматической корректировки принимаемых в расчетах значений параметров рельсовой линии при их изменении. При

¹ URL: <https://mathforyou.net/online/numerical/newton/>

этом влияние изменений значений параметров рельсовых цепей на точность расчетов требует дополнительных экспериментальных и практических исследований. Для дополнительного повышения помехоустойчивости каналов связи БИВК могут быть применены известные способы помехоустойчивого кодирования сигналов [16]. Метод позиционирования предлагается использовать в качестве резервного канала получения данных о местоположении подвижного состава, в частности в системах технического зрения [17], в спутниковых навигационных системах при отсутствии устойчивого сигнала. ▲

Список источников

1. Розенберг Е. Н. Комплексный подход к решению задачи повышения пропускной способности / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, И. А. Панферов // Автоматика, связь, информатика. — 2022. — № 8. — С. 2–6. — DOI: <https://doi.org/10.34649/AT.2022.8.8.001>.
2. Баранов Л. А. Энергоэффективные алгоритмы централизованного управления движением поездов при компенсируемых возмущениях в интеллектуальных системах управления внеуличного транспорта / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова // Материалы Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы», Москва, 26 мая 2022. — М.: РУТ (МИИТ), 2022. — С. 49–53. — URL: <https://elibrary.ru/WCEWQQ>.
3. Баранов Л. А. Планирование движения поездов в интеллектуальных транспортных системах / Л. А. Баранов, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Надежность. — 2022. — Т. 22. — № 3. — С. 35–43. — DOI: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43>.
4. Брылеев А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, А. В. Шишляков, Ю. А. Кравцов. — М.: Транспорт, 1978. — 344 с.
5. Anders E. Railway Signalling & Interlocking: international Compendium, 2-nd Edition / E. Anders, T. Berndt, I. Dolgij et al.; ed. S. V. Vlasenko, G. Theeg. — Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018. — 456 p. — URL: <https://elibrary.ru/QGVDEZ>.
6. Irlík M. Linear positioning of railway objects / M. Irlík // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. — 2016. — Iss. 95. — Pp. 49–57. — DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2017.96.5>.
7. Лунев С. А. Применение аппарата конформных отображений для непрерывного контроля координаты подвижной единицы на пути / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич // Известия Транссиба. — 2014. — № 1. — С. 94–99. — URL: <https://elibrary.ru/SAEOMV>.
8. Долганюк С. И. Повышение точности навигационного решения при позиционировании маневровых локомотивов за счет использования цифровых моделей путевого развития / С. И. Долганюк // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2010. — № 2. — С. 46–50. — URL: <https://elibrary.ru/NCRQQP>.
9. Кириллов С. Н. Комплекс позиционирования роботов на основе систем технического зрения и автономной видео- и радионавигации / С. Н. Кириллов, В. М. Бердников, И. В. Косткин, Э. В. Акопов и др. // Радиотехника. — 2016. — № 8. — С. 110–116. — URL: <https://elibrary.ru/WWQTHX>.
10. Желамский М. В. Электромагнитное позиционирование подвижных объектов: монография / М. В. Желамский. — М.: Физматлит, 2013. — 320 с.
11. Степанов Д. В. Программно-аппаратный комплекс автономного позиционирования мобильных робототехнических систем специального назначения / Д. В. Степанов, Д. А. Ишутин // Сборник докладов II Всероссийского форума научной молодежи «Богатство России», Москва, 10–11 декабря 2018. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ), 2019. — С. 96–98. — URL: <https://elibrary.ru/ZBNDDN>.
12. Максимов Г. А. Результаты морских испытаний программно-аппаратного комплекса акустического позиционирования буксируемых сейсмоков / Г. А. Максимов, А. Г. Григорьев, З. А. Корольков, В. Н. Коновалов и др. // Сборник трудов XXXIV сессии Российского акустического общества. — М.: ГЕОС, 2022. — С. 439–446. — DOI: <https://doi.org/10.34756/GEOS.2021.17.38116>.
13. Корогодин И. В. Определение взаимной ориентации и положения транспортных средств с помощью DSRC сигналов / И. В. Корогодин, В. В. Днепров // Радиотехника. — 2017. — № 11. — С. 9–21. — URL: <https://elibrary.ru/YPKGRL>.
14. Восков Л. С. Позиционирование датчиков беспроводной сенсорной сети как способ энергосбережения / Л. С. Восков, М. М. Комаров // Датчики и системы. — 2012. — № 1(152). — С. 34–38. — URL: <https://elibrary.ru/ONZZOD>.
15. Самарский А. А. Численные методы / А. А. Самарский, А. В. Гулин. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. — 432 с.
16. Краснюк А. А. Помехоустойчивое кодирование в системах сбора и обработки потоковых данных / А. А. Краснюк, А. Г. Прозорова // Датчики и системы. — 2021. — № 5. — С. 30–35. — DOI: <https://doi.org/10.25728/datsys.2021.5.6>.
17. Баранов Л. А. Погрешности измерения расстояния до препятствия средствами технического зрения в беспилотных системах управления движением поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина, А. Л. Охотников // Мир транспорта. — 2021. — Т. 19. — № 6(97). — С. 6–12. — DOI: <https://doi.org/10.30932/19923252-2021-19-6-1>.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 3, pp. 201–209
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-201-209

Solutions for the Autonomous, High-Precision Positioning of Railway Rolling Stock, Based on Rail Current Measurement

Information about authors

Sokolov S. V., Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department.

E-mail: s.v.s.888@yandex.ru

Shvalov D. V., PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department.

E-mail: d_shvalov@mail.ru

¹Moscow State Technical University of Communications and Informatics, North Caucasus Branch, "Informatics and Computer Science" Department, Rostov-on-Don

²Rostov State Transport University, "Railway Automation and Remote Control" Department, Rostov-on-Don

Abstract: The following paper will provide a comprehensive overview of the available solutions for autonomous positioning of railway and non-railway rolling stock. The paper sets out a method of autonomous positioning of railway transport that allows the real-time coordinates of any moving railway unit on a railway section of known length to be calculated with high accuracy. The method is predicated on the analysis of the measured rail current parameters. These may be either the track circuit signal current or the code current of automatic locomotive signalling. This method will ensure the physical implementation of the algorithms of modern device functionality, thus ensuring traffic safety. The proposed method facilitates the issue of positioning moving rolling stock throughout their entire route, including sections and stations, in the absence of satellite navigation systems, a crucial consideration in real-time operating conditions. The primary benefits of this method of positioning, in addition to its high accuracy, are its simplicity and the absence of the need for additional equipment along the railway bed and supplementary signals in the track circuits. A numerical example is provided to illustrate the high accuracy of determining the coordinates of moving railway units using the proposed method.

Keywords: autonomous rolling stock positioning; railway rolling units; on-board measuring and computing system.

References

- Rozenberg E. N., Ozerov A. V., Panferov I. A. Kompleksnyy podkhod k resheniyu zadachi povysheniya propusknoy sposobnosti [Complex approach to solving the problem of increasing capacity]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2022, Iss. 8, pp. 2–6. DOI: <https://doi.org/10.34649/AT.2022.8.8.001>. (In Russian)
- Baranov L. A., Balakina E. P., Loginova L. N. Energoeffektivnyye algoritmy tsentralizovannogo upravleniya dvizheniya poezdov pri kompensiruemyykh vozmushcheniyakh v intellektual'nykh sistemakh upravleniya vneulichnogo transporta [Energy-efficient algorithms for centralized train traffic control with compensable disturbances in intelligent off-street transport control systems]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Intellektual'nye transportnye sistemy"*, Moskva, 26 maya 2022 [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Intelligent Transport Systems", Moscow, May 26, 2022]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2022, pp. 49–53. Available at: <https://elibrary.ru/WCEWQQ>. (In Russian)
- Baranov L. A., Safronov A. I., Sidorenko V. G. Planirovaniye dvizheniya poezdov v intellektual'nykh transportnykh sistemakh [Train traffic planning in intelligent transport systems]. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2022, vol. 22, Iss. 3, pp. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43>. (In Russian)
- Brylev A. M., Shishlyakov A. V., Kravtsov Yu. A. *Teoriya, ustroystvo i rabota rel'sovykh tsepey* [Theory, design and operation of track circuits]. Moscow: Transport Publ., 1978, 344 p. (In Russian)
- Anders E., Berndt T., Dolgij I. et al. Railway Signalling & Interlocking: international Compendium, 2nd Edition. Ed. by S. V. Vlasenko, G. Theeg. Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018, 456 p. Available at: <https://elibrary.ru/QGVDEZ>.
- Irluk M. Linear positioning of railway objects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2016, Iss. 95, pp. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2017.96.5>.
- Lunev S. A., Seroshtanov S. S., Sokolov M. M., Khodkevich A. G. Primeneniye apparata konformnykh otobrazheniy dlya nepreryvnogo kontrolya koordinaty podvizhnoy edinitsy na puti [Application of conformal mapping apparatus for continuous monitoring of mobile unit coordinate on track]. *Izvestiya Transsiba* [Transsib News]. 2014, Iss. 1, pp. 94–99. Available at: <https://elibrary.ru/SAEOMV>. (In Russian)
- Dolganyuk S. I. Povysheniye tochnosti navigatsionnogo resheniya pri pozitsionirovaniy manevrovyykh lokomotivov za schet ispol'zovaniya tsifrovyykh modeley putevogo razvitiya [Improving the accuracy of navigation solution when positioning shunting locomotives using digital track development models]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2010, Iss. 2, pp. 46–50. Available at: <https://elibrary.ru/NCRQOP>. (In Russian)
- Kirillov S. N., Berdnikov V. M., Kostkin I. V., Akopov E. V. et al. Kompleks pozitsionirovaniya robotov na osnove sistem tekhnicheskogo zreniya i avtonomnoy video- i radionavigatsii [Robot positioning complex based on technical vision systems and autonomous video and radio navigation]. *Radiotekhnika* [Radio Engineering]. 2016, Iss. 8, pp. 110–116. Available at: <https://elibrary.ru/WWQTHX>. (In Russian)
- Zhelamitskiy M. V. *Elektromagnitnoye pozitsionirovaniye podvizhnykh ob'ektov: monografiya* [Electromagnetic positioning of moving objects: monograph]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2013, 320 p. (In Russian)
- Stepanov D. V., Ishutin D. A. Programmno-apparatnyy kompleks avtonomnoy pozitsionirovaniya mobil'nykh robototekhnicheskikh sistem spetsial'nogo naznacheniya [Software and hardware complex for autonomous positioning of special-purpose mobile robotic systems]. *Sbornik dokladov II Vserossiyskogo foruma nauchnoy molodezhi "Bogatstvo Rossii"*, Moskva, 10–11 dekabrya 2018 [Collection of reports of the II All-Russian Forum of Scientific Youth "Wealth of Russia", Moscow, December 10–11, 2018]. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman (NIU) Publ., 2019, pp. 96–98. Available at: <https://elibrary.ru/ZBNDDN>. (In Russian)
- Maksimov G. A., Grigor'ev A. G., Korol'kov Z. A., Konovalov V. N. et al. Rezul'taty morskikh ispytaniy programmno-apparatnogo kompleksa akusticheskogo pozitsionirovaniya buksiruemyykh seysmokok [Results of sea trials of the acoustic positioning system for towed seismic cables]. *Sbornik trudov XXXIV sessii Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva* [Collection of works of the XXXIV session of the Russian Acoustic Society]. Moscow: GEOS Publ., 2022, pp. 439–446. DOI: <https://doi.org/10.34756/GEOS.2021.17.38116>. (In Russian)
- Korogodin I. V., Dneprov V. V. Opredeleniye vzaimnoy orientatsii i polozheniya transportnykh sredstv s pomoshch'yu DSRC signalov [Determination of mutual orientation and position of vehicles using DSRC signals]. *Radiotekhnika* [Radio Engineering]. 2017, Iss. 11, pp. 9–21. Available at: <https://elibrary.ru/YPKGRG>. (In Russian)
- Voskov L. S., Komarov M. M. Pozitsionirovaniye datchikov besprovodnoy sensornoy seti kak sposob energosberezheniya [Positioning of wireless sensor network sensors as an energy saving method]. *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems]. 2012, Iss. 1(152), pp. 34–38. Available at: <https://elibrary.ru/ONZZOD>. (In Russian)
- Samarskiy A. A., Gulina A. V. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit. Publ., 1989, 432 p. (In Russian)
- Krasnyuk A. A., Prozorova A. G. Pomekhoustoychivoe kodirovaniye v sistemakh sbora i obrabotki potokovykh dannykh [Noise-resistant coding in data acquisition and processing systems]. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2021, Iss. 5, pp. 30–35. DOI: <https://doi.org/10.25728/datsys.2021.5.6>. (In Russian)
- Baranov L. A., Bestem'yanov P. F., Balakina E. P., Okhotnikov A. L. Pogreshnosti izmereniya rasstoyaniya do prep'yatstviya sredstvami tekhnicheskogo zreniya v bespilotnykh sistemakh upravleniya dvizheniem poezdov [Measurement errors of distance to obstacles using technical vision in unmanned train control systems]. *Mir transporta* [World of transport]. 2021, vol. 19, Iss. 6(97), pp. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-1>. (In Russian)