

А. В. Николаев¹, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., alarmoren@yandex.ru,
Е. И. Старовойтов², канд. техн. наук, зам. начальника отдела, info@i-progress.tech,
Д. В. Федосов³, канд. техн. наук, генеральный директор, xferra@mail.ru,
А. В. Колесников³, инженер, kolesnikov.radio@yandex.ru,
М. А. Филин¹, аспирант, maxim@filin000.ru,

¹ Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН, г. Москва,

² АО "НИИМА "Прогресс", г. Москва,

³ НПО "КВ-СВЯЗЬ", г. Омск

Навигация беспилотного транспорта на основе электромагнитной индукции

Рассматриваются вопросы определения положения беспилотного транспорта (БТ) в тоннелях в условиях отсутствия сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и неблагоприятных условий эксплуатации, таких как недостаточная освещенность, высокая влажность, радиоактивность и другие. Авторами предложен метод навигации БТ, основанный на явлении электромагнитной индукции. На борту БТ находятся генератор высоких частот, радиопередающий блок, радиоприемный блок, информационно-управляющая система, а под несущей или опорной поверхностью движителя БТ расположена согласованная с окружающей средой посредством активной нагрузки однопроводная линия радиопередачи. Генератор высоких частот передает ток высокой частоты на радиопередающий блок, возбуждающий однопроводную линию радиопередачи, которая излучает высокочастотный радиосигнал, поступающий на радиоприемный блок для дальнейшего преобразования информационно-управляющей системой в электрические сигналы управления БТ. В качестве излучающих антенн из состава радиопередающего блока могут быть использованы магнитные рамки или электрические вибраторы, а в качестве приемных антенн — магнитные рамки или ферритовые датчики, возбуждаемые высокочастотным магнитным полем линии радиопередачи. В статье обсуждается влияние окружающего пространства на процессы излучения и приема радиосигналов. Проведена компьютерная апробация разработанного метода в системе трехмерного электромагнитного моделирования. Для передачи и приема радиосигнала использовались электрически малые рамочные антенны, расположенные ортогонально. Показано, что анализ фазы коэффициента передачи в обоих случаях может дать достаточную информацию о направлении и значении отклонения от трассы, задаваемой с помощью линии радиопередачи. Результаты исследования могут быть полезны для разработки навигационных систем БТ в условиях ограниченной доступности сигналов ГНСС.

Ключевые слова: навигационное оборудование, беспилотный транспорт, тоннель, направляющая линия, электромагнитная индукция, радиосигнал, однопроводная линия радиопередачи, высокие частоты, электрически малые антенны, компьютерное моделирование

Введение

В настоящее время у беспилотного транспорта (БТ) отсутствует способность определять собственное положение в тоннелях из-за отсутствия сигналов ГНСС. Использование видеозаписей и ультразвуковых сигналов для позиционирования БТ возможно при наличии безаварийной работы источников искусственного света, стабильной освещенности тоннеля и симметричного распределения света вдоль него, а также в отсутствие рассеивающих свет взвешенных частиц в воздухе и многократных отражений акустических волн от стенок тоннеля.

Реальные условия эксплуатации БТ, особенно в тоннелях горнодобывающей промышленности, — это отсутствие требуемой освещенности окружающего пространства, повышенная влажность и нередко радиоактивность, высокая температура и концентрация химических продуктов, наличие пожаро- и взрывоопасной атмосферы, различие в несущих свойствах и неровностях опорной поверхности, нерегулярные поперечные сечения транспортных туннелей, наличие жидких или полужидких смесей воды и различных видов почвы и т. п. Указанные условия предъявляют дополнительные требования к БТ и

его радиоэлектронным средствам навигационного обеспечения.

В связи с этим определенным интересом представляет метод навигации БТ, основанный на использовании явления электромагнитной индукции, возникающей между направляющим проводом, радиопередающим блоком и устройством приема вторичного радиосигнала, излучаемого проводом. Указанный принцип функционирования радиоэлектронного средства навигационного обеспечения БТ не зависит от наличия сигналов ГНСС, не требует создания вышеуказанных условий эксплуатации БТ, учета многократных отражений от стенок тоннеля и времени распространения радиоволн в пределах зоны индукции или сферы Чу, охватываемой антенны радиопередающего и радиоприемного блоков, а также часть пространства, окружающего направляющий провод.

Понимание влияния окружающего БТ пространства на процессы излучения и приема радиосигналов, на создаваемые методы и средства оценки его положения в пространстве позволяют наделять БТ способностью определять собственное положение в условиях отсутствия сигналов ГНСС.

При таком подходе возможно создание бортовой информационно-управляющей системы (БИУС) и исполнительных механизмов, обеспечивающих формирование полосы движения БТ и его автоматическое управление вдоль тоннеля.

Обзор известных систем наведения колесного транспорта

Широко известна индукционная система наведения колесного транспортного робота [1, 2], траектория движения которого задается кабелем, проложенным под полом помещения. При подаче через кабель переменного низкочастотного электрического тока вокруг него создается квазистатическое электромагнитное поле. На борту робота установлены приемные катушки, сигналы от которых пропорциональны отклонению от трассы. Эти сигналы усиливаются и передаются в блок обработки сигналов, формирующий команды, выдаваемые в ходовую часть робота.

Модуляция частоты переменного тока, подаваемого по кабелю, также позволяет передавать роботу информацию о параметрах его движения. Схема индукционной системы навигации мо-

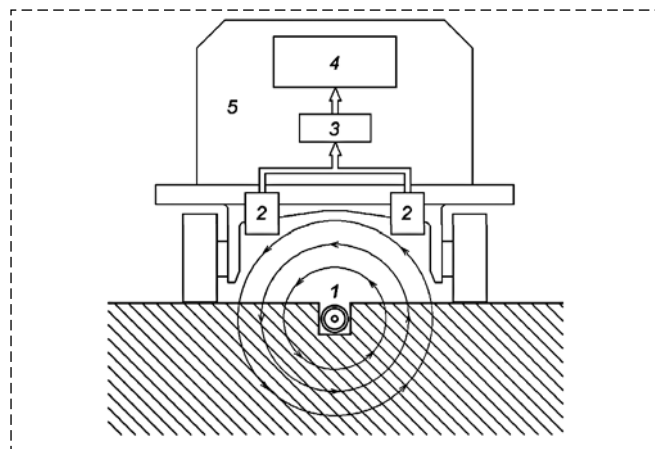


Рис. 1. Схема индукционной системы навигации мобильного робота

Fig. 1. The scheme of the induction navigation system of the mobile robot

бильного робота с использованием токоведущего кабеля показана на рис. 1: 1 — токоведущий кабель; 2 — приемные антенны; 3 — блок обработки сигналов; 4 — ходовая часть; 5 — шасси.

Аналогичная система, разработанная для сельского хозяйства, позволяет определять координаты беспилотного трактора на поле [3]. В этом случае траектория движения по обрабатываемому полю задается посредством подземных токоведущих проводов.

Кроме того, известна система вождения и навигации водного транспорта [4] с использованием токоведущего кабеля, проложенного по дну акватории. Генератор тока в такой системе расположен на берегу, а приемная аппаратура установлена на судне, при этом вдоль токоведущего кабеля установлены не меньше двух гидроакустических маяков с известными координатами и различающимися частотами излучения импульсных сигналов, синхронизированных по тому же кабелю.

В аналогичной системе для сухопутного транспорта с подземным токоведущим кабелем, проложенным под магистральной дорогой [5], для приема используются два индукционных магнитоприемника, ортогонально расположенные в горизонтальной плоскости транспортного средства, и бортовое устройство регистрации параметров магнитной составляющей квазистатического электромагнитного поля. В систему могут входить расположенные вдоль основной трассы металломинерализованные грунтовые дорожки, железобетонные плиты с ориентированной вдоль региональной дороги металлической арматурой, обесточен-

ные металлосодержащие кабели и другие металлосодержащие подземные коммуникации, а также бортовые детектор металлов и устройство регистрации параметров детекции.

Токоведущий кабель и магнитная лента широко применяется для навигации мобильных роботов и AGV (англ. *automated guided vehicle* — автоматических самоходных тележек) внутри промышленных и складских сооружений [6—12].

Общие недостатки решений, предложенных в работах [1—9, 12], заключаются в том, что все они подразумевают использование токоведущего кабеля и подключаемого к нему контактным способом генератора переменного тока. При обрыве токоведущего кабеля или отказе генератора происходит потеря работоспособности системы вождения и навигации. В таких системах не представляется возможным определить значение отклонения от кабеля, так как используется переменный ток низких частот, близких к промышленным, применение которого может быть ограничено в горных выработках с пожаро- и взрывоопасной атмосферой, влагонасыщенной несущей или опорной поверхностью. Кроме того, могут быть технические проблемы при обеспечении электромагнитной совместимости шахтного оборудования.

Область применения систем, рассмотренных в работах [1, 2], ограничена промышленной робототехникой, а система, обсуждаемая в работе [4], может использоваться для морской навигации и судовождения. Недостатки системы, представленной в работе [5], состоят в жестких требованиях к ортогональности пространственного размещения индукционных магнитоприемников.

Применение способа навигации по магнитной ленте [6—8, 12] ограничено ее износом из-за трения и повреждений, для устранения которых необходима регулярная замена ленты.

Комплексирование аппаратуры навигации по токоведущему кабелю и магнитной ленте между собой и датчиками других типов не всегда возможно, чрезмерно усложняет систему и может потребовать дополнительного оборудования трассы.

Для преодоления указанных недостатков существующих систем индукционной навигации предлагается метод навигации по однопроводной линии радиопередачи [13], который может быть использован для БТ с колесными, гусеничными и другими типами движителей.

Метод навигации БТ по однопроводной линии радиопередачи

Предлагаемый метод навигации БТ реализуется следующим образом. Бортовой радиоприемный блок получает сигналы от однопроводной линии радиопередачи, находящейся в высокочастотном электромагнитном поле бортового радиопередающего блока (рис. 2), посредством индукционной связи через две среды распространения (несущую или опорную поверхность движителя и атмосферу). На рис. 2 обозначены: 1 — генератор высоких частот; 2 — радиопередающий блок; 3 — окружающая среда (под опорной поверхностью); 4 — активная нагрузка; 5 — однопроводная линия радиопередачи; 6 — радиоприемный блок; 7 — бортовая информационно-управляющая система; 8 — БТ.

Особенностью метода является тот факт, что в данном случае используются зоны индукции излучающей и приемной радиосистем БТ, при этом не требуется учитывать время запаздывания радиосигнала и коэффициент преломления электромагнитной волны на границе двух сред распространения.

Однопроводная линия радиопередачи (далее направляющая линия — НЛ) представляет собой кабель с жилами из проводника. В качестве излучающих элементов из состава радиопередающего блока могут быть использованы магнитные рамки или электрические вибраторы, а в качестве приемных — магнитные рамки или ферритовые датчики, возбуждаемые высокочастотным магнитным полем НЛ.

Амплитуда поступившего сигнала определяет значение отклонения БТ от трассы, а фаза — направление отклонения (влево или вправо). На основе этих сигналов БИУС автоматически

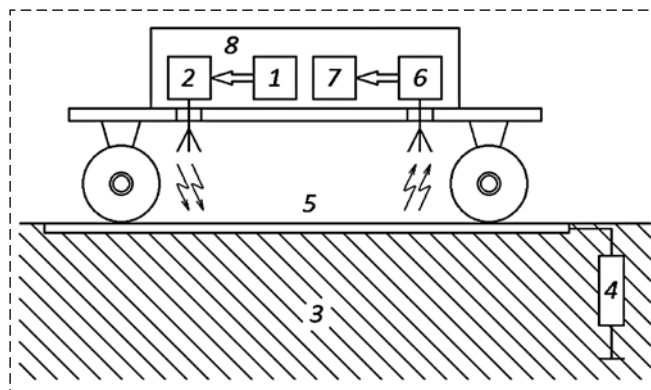


Рис. 2. Навигация по однопроводной линии радиопередачи
Fig. 2. Navigation on a single-wire radio transmission line

выдает команды управления двигателям (исполнительным устройствам) или обеспечивает соответствующую индикацию параметров движения, например, на экране диспетчера в центре организации дорожного движения.

Таким образом, идеология предлагаемого метода навигации заключается в определении радиоволновым способом линейного отклонения и путевого угла относительно уложенного в грунт одиночного провода (НЛ), возбужденного излучателем электромагнитных волн в ближней зоне антенн, за счет регистрации радиоприемным блоком амплитуды и фазы сигнала. Амплитуда радиосигнала характеризует значение отклонения антенн от продольной оси провода, а фаза — направление отклонения. Анализ данных параметров сигнала в алгоритмах работы БИУС позволяет синтезировать заданное значение отклонения и угол поворота БТ.

Все радиотехнические измерения в данном методе выполняются в зоне индукции или сфере Чу [14], радиус которой определяется выражением

$$R = \frac{c}{2\pi f \sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (1)$$

где f — частота высокочастотного радиосигнала; ϵ и μ — относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; c — скорость света в вакууме.

Для $f = 30$ МГц радиус будет равен $R = 1,59$ м в воздушной среде. Максимум стоячей волны в антенне навигационного приемного устройства соответствует условию $R/2 = 0,79$ м.

При использовании в БИУС БТ цифрового дискриминатора с числом каналов, равным $n = 256$, линейное разрешение по отклонению от заданной траектории будет равно

$$\Delta d_0 = \frac{R}{2n} = 3,11 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

а погрешность измерения путевого угла объекта может быть оценена выражением

$$\Delta b_0 = \arctg\left(\frac{R}{2nl}\right), \quad (2)$$

где l — база между антеннами.

Таким образом, погрешность измерений путевого угла при длине базы $l = 4$ м с 256-канальным цифровым дискриминатором составит $\Delta\beta_0 = 0^\circ 2' 39''$.

Допустим, что приемная и передающая антенны расположены вдоль оси БТ, а оси антенн

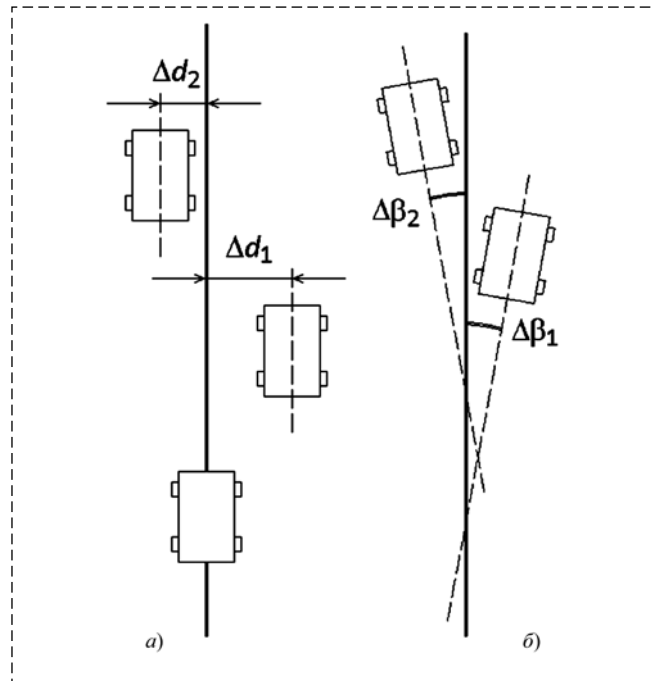


Рис. 3. Иллюстрация линейного (а) и углового (б) отклонений от трассы

Fig. 3. Illustration of linear (a) and angular (b) deviation from the path

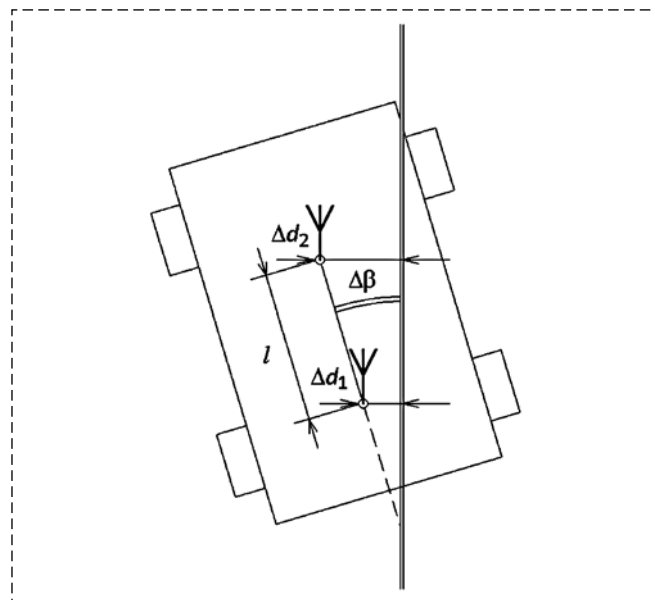


Рис. 4. Отклонение от трассы для антенн в передней и задней части БТ при его развороте

Fig. 4. Deviation from the path for the antennas in the front and rear of the unmanned vehicle when it turns around

взаимно перпендикулярны друг другу. Отклонение от выбранного направления характеризуется величинами Δd и $\Delta\beta$ (рис. 3). При отклонении от НЛ величина Δd для антенн в передней и задней части БТ будет отличаться и определяться углом отклонения β (рис. 4):

$$\Delta d = d_2 - d_1 = l \sin\beta.$$

Пусть передающая антенна излучает гармонический сигнал с начальной фазой φ_1 :

$$\dot{A}_1 = A_1 \exp[i(\omega t + \varphi_1)], \quad (3)$$

тогда сигнал на приемной антенне будет определяться по формуле

$$\begin{aligned} \dot{A}_2 &= A_2 \exp[i(\omega t + \varphi_2)] = \\ &= A_2 \exp[i(\omega t + \varphi_2 + \varphi_{12})], \end{aligned} \quad (4)$$

где φ_{12} — фазовый сдвиг, обусловленный отклонением от НЛ.

Коэффициент передачи для такой НЛ может быть определен с помощью выражения

$$\dot{K}_{12} = \frac{A_2 \exp[i(\omega t + \varphi_1 + \varphi_{12})]}{A_1 \exp[i(\omega t + \varphi_1)]} = S_{12} \exp(i\varphi_{12}). \quad (5)$$

Измеряя фазу коэффициента передачи φ_{12} , можно определить направление отклонения от трассы, а измеряя скорость изменения фазы и значение модуля коэффициента передачи S_{12} , можно определить угол отклонения:

$$b = \arcsin\left(\frac{\Delta d}{l}\right), \quad (6)$$

где $\Delta d \sim S_{12}$.

Компьютерная апробация метода навигации БТ

Для верификации разработанного метода навигации проведен компьютерный эксперимент. Апробация метода осуществлялась путем трехмерного электромагнитного моделирования с использованием программы ЭДЭМ (ЭлектроДинамика Элементов из Металла с трехмерной геометрией), предназначенной для проектирования антенной техники [15, 16].

Зависимости $d(S_{12}, \varphi_{12})$, $\beta(S_{12}, \varphi_{12})$ взаимосвязаны и определяются типом антенн и их взаимным расположением, значением базы между антеннами, материалами, из которого изготовлен БТ, высотой подвеса антенн над НЛ и формируются в виде базы данных на этапе калибровки навигационного оборудования, реализующего данную методику.

В компьютерном эксперименте обе антенны — электрически малые рамки, расположенные в ортогональных плоскостях. Высота H подъема антенн над НЛ принята одинаковой для каждой из антенн. Моделировалось отклонение от НЛ всего ТС, как показано на рис. 3, а. На рис. 5 (см. третью сторону обложки) приведены графики зависимости $S_{12}(d)$ и $\varphi_{12}(d)$ при $H = 0,5$ м для двух частот: 15 МГц и 30 МГц.

В данной модели рамочные антенны были согласованы по импедансу с коэффициентом стоячей волны менее 1,5. Рассматривались рамки с различным внешним радиусом R_A :

1) $R_A = 0,14$ м, т. е. на частоте $f = 15$ МГц электрические размеры антенн $kr = 2\pi f/\lambda = 0,066$, на частоте $f = 30$ МГц $kr = 0,13$;

2) $R_A = 0,24$ м, т. е. на частоте $f = 15$ МГц $kr = 0,11$, на частоте $f = 30$ МГц $kr = 0,23$.

Амплитуда сигнала при отклонении от трассы в каждом из направлений будет падать одинаково, что показывают графики на рис. 5, а (см. третью сторону обложки). Так как вектор индукции магнитного поля подчиняется правилу правого базиса в трехмерном пространстве (так называемому правилу буравчика), при отклонении в различные направления от НЛ сигналы в приемной антенне будут в противофазе. Но поскольку в приемной антенне сигнал представляет собой суперпозицию прямой волны ближней зоны передающей антенны и поля НЛ, фаза коэффициента передачи будет частотно-зависимой. На рис. 5, б (см. третью сторону обложки) представлены зависимости $\varphi_{12}(d)$. Чем меньше база между антеннами, тем сильнее их связь по ближнему полю.

На рис. 6 (см. третью сторону обложки) приведены зависимости $S_{12}(\beta)$ и $\varphi_{12}(\beta)$ при угловом отклонении от трассы. Заметно более резкое изменение модуля коэффициента передачи $S_{12}(\beta)$ при аналогичных предыдущему случаю зависимостях фазы $\varphi_{12}(\beta)$.

Результаты моделирования показывают, что изменение фазы коэффициента передачи достаточно для определения направления движения БТ и значения его отклонения от трассы, а зависимость от этих параметров модуля коэффициента передачи является менее выраженной, что затрудняет его использование в навигации.

Заключение

Предлагаемый метод навигации в условиях отсутствия сигналов ГНСС обеспечивает надежную и безопасную эксплуатацию БТ в экранированных тоннелях, а также горных выработках с пожаро- и взрывоопасной атмосферой, влагонасыщенной несущей или опорной поверхностью. Это достигается путем бесконтактного возбуждения НЛ, при котором исключается образование плазмы и электрический пробой среды распространения радиосигнала.

Было проведено моделирование двух сценариев. В первом — на передачу и прием ис-

пользовались электрически малые рамочные антенны, расположенные ортогонально, во втором — передающей антенной был электрически малый симметричный диполь. Показано, что анализ фазы коэффициента передачи в обоих случаях может дать достаточную информацию о направлении и значении отклонения от трассы, созданной искусственным способом с помощью НЛ. Зависимость модуля коэффициента передачи от значения отклонения или от угла отклонения менее информативна для сценария с электрическим вибратором в качестве передающей антенны вместо рамочной антенны.

Технически рамочные антенны могут быть выполнены в виде одно- или многовитковых конструкций на жестком каркасе в прочном корпусе, например из полиэфирного композита или углеводородного полимера. Для их настройки на рабочую частоту целесообразно использовать конденсатор переменной емкости с процессорной авторегулировкой.

Для технической реализации указанного метода навигации в составе БТ должен быть БИУС, в которой хранится база данных сигнатур, полученных путем измерений радиосигналов вдоль откалиброванных НЛ, возбуждаемых радиопередающим блоком. При автономном движении БТ вдоль НЛ происходит сопоставление реальных сигналов с базой данных, что позволит поддерживать заданную траекторию при движении БТ в тоннеле при отсутствии сигналов ГНСС.

Список литературы

1. **Козырев Ю. Г.** Промышленные роботы: справочник. М.: Машиностроение, 1988. 392 с.
2. **Тимофеев А. В.** Адаптивные робототехнические системы. Л.: Машиностроение, 1988. 332 с.
3. **Калужный А. Т.** Автовождение беспилотных тракторов // Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация. 2021. № 4. С. 74–82. DOI: 10.26160/2587-7577-2021-4-74-82

4. **Патент RU 2596244 C1.** Кочаров О. М., Кочаров К. О., Кочаров А. О., Кочаров А. А. / Кочаров А. О. Арктическая подводная навигационная система для вождения и навигационного обеспечения надводных и подводных объектов навигации в стесненных условиях плавания. Заявка 2015133286/28, приоритет от 2015.08.10. Публ. 2016.09.10.

5. **Патент RU 2652167 C1.** Кочаров А. О. / Кочаров А. О. Арктическая система вождения и навигационного обеспечения наземного транспорта. Заявка 2017106045, приоритет от 2017.02.27. Публ. 2018.04.25.

6. **Vale A., Ventura R., Lopes P., Ribeiro I.** Assessment of navigation technologies for automated guided vehicle in nuclear fusion facilities // Robotics and Autonomous Systems. 2017. Vol. 97. P. 153–170.

7. **Moshayedi A. J., Jinsong L., Liao L.** AGV (automated guided vehicle) robot: Mission and obstacles in design and performance // Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering. 2019. Vol. 12, Iss. 4. P. 5–18.

8. **Udvardy P., Széll K.** Advanced Navigation of Automated Vehicles in Smart Manufacturing // Acta Technica Napocensis. Electronica-Telecomunicatii. 2019. Vol. 60, Iss. 1. P. 11–14.

9. **Varshney A., Aryan A., Singh A., Dubey N., Singh A. K.** Modular on-Road Self-Guided Automatic Vehicle and Concept of Self-Power Transmission // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2020. Vol. 9, Iss. 4. P. 1978–1981. DOI: 10.35940/ijeat.D9022.049420

10. **Rubanov V., Bushuev D., Karikov E., Bazhanov A., Alekseevsky S.** Development a low-cost navigation technology based on metal line sensors and passive RFID tags for industrial automated guided vehicle // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15. P. 2291–2297.

11. **Алексеевский С. В., Рубанов В. Г., Бушуев Д. А., Маслиев Е. А.** О выборе конфигурации сенсорной подсистемы при разработке автоматической транспортной тележки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 459–465.

12. **Aizat M., Azmin A., Rahman W.** A Survey on Navigation Approaches for Automated Guided Vehicle Robots in Dynamic Surrounding // IEEE Access, 2023. Vol. 11. P. 33934–33955. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3263734.

13. **Способ** навигации транспортной и технологической машины по однопроводной линии радиопередачи. Заявка на изобретение № 2023107633. Приоритет от 29.03.2023 / АО "НИИМА "Прогресс" / А. В. Николаев, Е. И. Старовойтов, З. К. Кондрашов, Е. С. Скиба, А. А. Амбарян, Д. М. Бодунов, Д. А. Прохоркин, А. В. Колесников, Н. Б. Федосова.

14. **Hansen R. C.** Electrically Small, Superdirective, and Superconducting Antennas. Newark, NJ, Wiley, 2006, 182 p.

15. **Давыдов А. Г., Пименов Ю. В.** Возможности программы ЭДЭМ для разработки устройств антенной техники // Антенны. 2006. № 12 (115). С. 54–67.

16. **ЭДЭМ.** Программа для расчета электромагнитных полей и исследования электродинамических свойств структур из проводящих элементов. Возможности программы для расчета электромагнитных полей. URL: <http://edem3d.ru/index.php?action=content&id=2>

Navigation Technology of Unmanned Vehicles Based on Electromagnetic Induction

A. V. Nikolaev¹, alarmoren@yandex.ru, **E. I. Starovoitov**², info@i-progress.tech, **D. V. Fedosov**³, xferra@mail.ru,
A. V. Kolesnikov³, kolesnikov.radio@yandex.ru, **M. A. Filin**¹, maxim@filin000.ru,

¹ Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 101990, Russian Federation

² JSC Progress MRI, Moscow, 125183, Russian Federation,

³ RPSLL "HF Communication", Omsk, 644012, Russian Federation,

Corresponding author: Starovoitov E. I., PhD. JSC Progress MRI, Moscow, 125183, Russian Federation, e-mail: info@i-progress.tech

Accepted on July 25, 2023

Abstract

The article deals with the issues of determining the position of unmanned vehicles (UV) in tunnels in the absence of signals from global navigation satellite systems (GNSS) and unfavorable operating conditions, such as low light, high humidity.

dity, radioactivity and others. The authors propose a method for navigating unmanned vehicles based on the phenomenon of electromagnetic induction. On board the unmanned vehicle there is a high-frequency generator, a radio transmitting unit, a radio receiving unit, an information management system, and under the bearing or supporting surface of the unmanned vehicle propulsion unit there is a single-wire radio transmission line coordinated with the environment by means of an active load. The high-frequency generator transmits high-frequency current to the radio transmitting unit, which excites a single-wire radio transmission line, the single-wire radio transmission line emits a high-frequency radio signal supplied to the radio receiving unit for further conversion by the information management system into electrical control signals of an unmanned vehicle. Magnetic loops or electrical vibrators can be used as radiating antenna from the radio transmitting unit, and magnetic loops or ferrite probe excited by the high-frequency magnetic field of the radio transmission line can be used as receiving antenna. The article deals with the influence of the environment on the processes of radiation and reception of radio signals. Computer testing of the developed method was carried out with using three-dimensional electromagnetic modeling. Electrically small loop antennas located orthogonally were used to transmit and receive the radio signal. It was shown that the phase analysis of the transmission gain in both cases can provide ample information about the direction and deviation rate from the path which is set using the radio transmission line. The results of the study can be useful for the development of navigation systems for unmanned vehicles in conditions of limited availability of signals from GNSS.

Keywords: navigation equipment, unmanned vehicle, tunnel, guide line, electromagnetic induction, radio signal, single-wire radio transmission line, high frequencies, electrically small antennas, computer modeling

For citation:

Nikolaev A. V., Starovoitov E. I., Fedosov D. V., Kolesnikov A. V., Filin M. A. Navigation Technology of Unmanned Vehicles Based on Electromagnetic Induction, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 11, pp. 583–589 (in Russian).

DOI: 10.17587/mau.24.583-589

References

1. **Kozyrev Yu. G.** Industrial robots: a reference guide, Moscow, Mashinostroenie, 1988, 392 p. (in Russian).
2. **Timofeev A. V.** Adaptive robotic systems. Leningrad, Mashinostroenie, 1988, 332 p (in Russian).
3. **Kalyuzhnyi A. T.** Automatic Driving of Unmanned Tractors, *Mashiny, agregaty i protsessy. Proektirovanie, sozdanie i modernizatsiya*, 2021, no. 4, pp.74–82, doi: 10.26160/2587-7577-2021-4-74-82 (in Russian).
4. **Patent RU 2596244C1.** Kocharov O. M., Kocharov K. O., Kocharov A. O., Kocharov A. A. Arctic underwater navigation system for driving and navigation support of water surface and underwater objects of navigation in constrained conditions of navigation. Application RU2015133286/28A, Priority date 2015.08.10. Publication date 2016.09.10.
5. **Patent RU 2652167C1.** Kocharov A. O. Arctic system of ground transport driving and navigation support. Application RU2017106045A, Priority date 2017.02.27. Publication date 2016.09.10.
6. **Vale A., Ventura R., Lopes P., Ribeiro I.** Assessment of navigation technologies for automated guided vehicle in nuclear fusion facilities, *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, vol. 97, pp. 153–170.
7. **Moshayedi A. J., Jinsong L., Liao L.** AGV (automated guided vehicle) robot: Mission and obstacles in design and performance, *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, 2019, vol. 12, iss. 4, pp. 5–18.
8. **Udvardy P., Széll K.** Advanced Navigation of Automated Vehicles in Smart Manufacturing, *Acta Technica Napocensis. Electronica-Telecomunicatii*, 2019, vol. 60, iss. 1, pp. 11–14.
9. **Varshney A., Aryan A., Singh A., Dubey N., Singh A. K.** Modular on-Road Self-Guided Automatic Vehicle and Concept of Self-Power Transmission, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2020, vol. 9, iss. 4, pp. 1978–1981, doi: 10.35940/ijeat.D9022.049420
10. **Rubanov V., Bushuev D., Karikov E., Bazhanov A., Alekseevsky S.** Development a low-cost navigation technology based on metal line sensors and passive RFID tags for industrial automated guided vehicle, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2020, vol. 15, pp. 2291–2297.
11. **Alekseevsky S. V., Rubanov V. G., Bushuev D. A., Masliev E. A.** Selecting a Sensor configuration in the Development of Automatic Transport Trolley, *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2021, no. 2, pp. 459–465 (in Russian).
12. **Aizat M., Azmin A., Rahiman W.** A Survey on Navigation Approaches for Automated Guided Vehicle Robots in Dynamic Surrounding, *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 33934–33955, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3263734.
13. **Priority** to RU2023107633A. A method of navigation of a transport and technological machine on a single-wire radio transmission line. JSC Progress MRI, A. V. Nikolaev, E. I. Starovoitov, Z. K. Kondrashov, E. S. Skiba, A. A. Ambaryan, D. M. Bodunov, D. A. Prokhorkin, A. V. Kolesnikov, N. B. Fedosova. Priority date 2023.03.29
14. **Hansen R. C.** Electrically Small, Superdirective, and Superconducting Antennas, Newark, NJ, Wiley, 2006, 182 p.
15. **Davydov A. G., Pimenov Yu. V.** Abilities of Program EDEM for Antenna Designing, *Antennas*, 2006, no. 12 (115), pp. 54–67 (in Russian).
16. **EDEM.** A program for electromagnetic fields calculating and researching into the electrodynamic properties of conducting structures. Program for calculation of electromagnetic fields, available at: http://edem3d.ru/index_eng.php