

Непрерывная навигация персонала внутри и снаружи помещений

Е. Старовойтов, к. т. н.¹, Е. Скиба²

УДК 629.056.8 | ВАК 2.2.11

Предложен способ непрерывной навигации абонента с портативным носимым устройством типа смартфона или планшета, обеспечивающий непрерывную навигацию при переходе из зоны устойчивого приема локальной системы навигации на открытой местности в экранирующее сооружение с установленной системой Indoor-навигации и обратно. Перечислены основные технологии аппаратной реализации и примеры применения Indoor-навигации на форуме «Микроэлектроника 2023», показаны направления дальнейшего совершенствования систем Indoor-навигации.

В настоящее время актуальной является проблема бесшовного перехода между зонами действия глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), либо локальной системы навигации (ЛСН) и системы Indoor-навигации, предназначенной для навигации внутри закрытых объектов.

В предыдущей статье [1] рассматривалось техническое решение, обеспечивающее непрерывную навигацию беспилотного транспортного средства (БТС) или робота при переходе из зоны устойчивого приема ЛСН на открытой местности внутрь экранирующего сооружения, в котором установлена система Indoor-навигации, и обратно.

Особенностью данного способа являются заметные различия при навигации персонала и БТС. Задачей бесшовной навигации пешего абонента в процессе его перемещения по протяженным промышленным сооружениям является постоянное определение местоположения абонента, позволяющее ему выбирать оптимальный маршрут движения и перемещаться внутри сооружения и по прилегающей к нему территории с минимально возможными отклонениями и потерями времени.

На крупных промышленных предприятиях можно выделить несколько уровней навигации. Внутренний уровень навигации подразумевает определение местоположения абонента внутри сооружений и зданий. Промежуточный уровень включает всевозможные пристройки и переходы в другие сооружения, прилегающие

территории, которые также должны быть охвачены навигационными системами. И, наконец, внешний уровень навигации подразумевает привязку к географическим координатам.

Таким образом, для беспрепятственного перемещения абонента и определения им собственного местоположения, его навигационная аппаратура должна обеспечить быстрое и правильное переключение между сигналами Indoor-навигации и ГНСС/ЛСН.

Рассматриваемая проблематика актуальна в роботизированной логистике, обеспечивающей доставку «от двери до двери» без участия человека, для реализации «безлюдных технологий» на производстве, при контроле за перемещениями персонала на предприятиях, учащихся в учебных заведениях, пациентов в медицинских учреждениях и т.д.

НЕПРЕРЫВНАЯ НАВИГАЦИЯ АБОНЕНТА С ПОРТАТИВНЫМ НОСИМЫМ УСТРОЙСТВОМ

Известна система позиционирования объектов на открытой местности и внутри помещений [2], включающая устройство оптического трекинга, устройство инерциального трекинга, устройство локального трекинга, устройство спутникового трекинга, роботизированный тахеометр и блок сбора и обработки данных с устройств. В этой системе постоянно функционируют устройство оптического трекинга, устройство инерциального трекинга и программная часть, а устройство локального трекинга, устройство спутникового трекинга и роботизированный тахеометр работают только в определенных условиях, при этом получаемые от них данные могут иметь разный уровень достоверности.

Недостатки такого технического решения состоят в постоянном использовании оптических средств видимого или

¹ АО «НИИМА «Прогресс», заместитель начальника отдела разработки смешанных СВЧ-модулей.

² АО «НИИМА «Прогресс», начальник отдела главного конструктора.

инфракрасного диапазона, работоспособность которых ограничена светотехнической обстановкой и загрязнением оптических поверхностей, обязательном наличии характерных объектов либо внесении специальных меток для позиционирования относительно них, сложной конструкции аппаратуры с большим количеством датчиков.

Решением поставленной задачи является способ непрерывной навигации при переходе абонента из открытой местности в экранирующее сооружение. В этом способе вход в зону действия системы Indoor-навигации находится либо в зоне устойчивого приема навигационных сигналов ЛСН, от которой по связному каналу поступает команда переключения портативного носимого устройства на сигналы системы Indoor-навигации. В случае отсутствия навигационных сигналов ЛСН имеется переходная зона с обозначенными ограждениями, указателями или другими маркерами маршрутом, в конце которой начинается зона действия системы Indoor-навигации, обозначенная QR-кодом или маркером другого типа. QR-код считывается портативным носимым устройством абонента, после чего сигналы системы Indoor-навигации становятся приоритетными при определении местоположения абонента до момента считывания портативным носимым устройством абонента QR-кода, маяка, метки или маркера, обозначающих выход из зоны действия системы Indoor-навигации. При выходе абонента из зоны действия системы Indoor-навигации без считывания соответствующего QR-кода, маяка, метки или маркера, после длительного отсутствия сигнала Indoor-навигации и наличии сигналов ЛСН специальное программное обеспечение портативного носимого устройства запрашивает у абонента команду для переключения на сигналы ЛСН.

При навигации абонента с помощью портативного носимого устройства в переходной зоне маршрут определяется визуально по разметке на полу, ограждениям, указателям и другим маркерам, предназначенным для навигации персонала. На границе переходной зоны и зоны действия системы Indoor-навигации размещается QR-код, маяк, метка или любой другой маркер, считываемый портативным носимым устройством [1].

Аналогично выполняется переключение на сигналы ЛСН при выходе из переходной зоны наружу.

Портативное носимое устройство абонента в минимальной конфигурации должно иметь приемопередающий блок, совместимый с ЛСН и системой Indoor-навигации, а также встроенную телекамеру.

Использование ГНСС-приемника в портативном носимом устройстве абонента позволяет обеспечить дополнительную надежность, при условии надежного приема сигналов навигационных спутников.

В качестве примера реализации способа непрерывной навигации рассмотрим задачу перемещения между двумя пунктами: доставку груза с базы на место назначения – в экранированное сооружение (склад).

Навигационный алгоритм движения абонента с портативным носимым устройством по маршруту представлен на рис. 1.

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АБОНЕНТСКОГО УСТРОЙСТВА И ПРИМЕРЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Для позиционирования абонента внутри помещения могут быть использованы различные методы определения координат, базирующиеся на соответствующих беспроводных технологиях связи (табл. 1).

Таблица 1. Различные технологии позиционирования абонента

Технология	Частотный диапазон	Погрешность определения координат	Метод определения координат
Bluetooth	2,4...2,5 ГГц	1,0 м 0,1 м*	RSSI (Received Signal Strength Indicator) – определение расстояния до радиопередатчика по мощности (уровню) сигнала; AoA (Angle of Arrival) – определение положения объекта по углу прибытия сигнала
Wi-Fi	2,4...2,5 ГГц 4,9...5,5 ГГц	3,0 м	TDoA (Time Difference of Arrival) – дальномерный беззапросный метод
UWB	1,0 ГГц 3,0...5,0 ГГц 6,0...10,0 ГГц	< 0,1 м	ToF (Time of Flight) – дальномерный беззапросный метод; AoA (Angle of Arrival) – определение положения объекта по углу прибытия сигнала

* При использовании технологии Bluetooth 4.0 и выше (Bluetooth Low Energy – BLE)

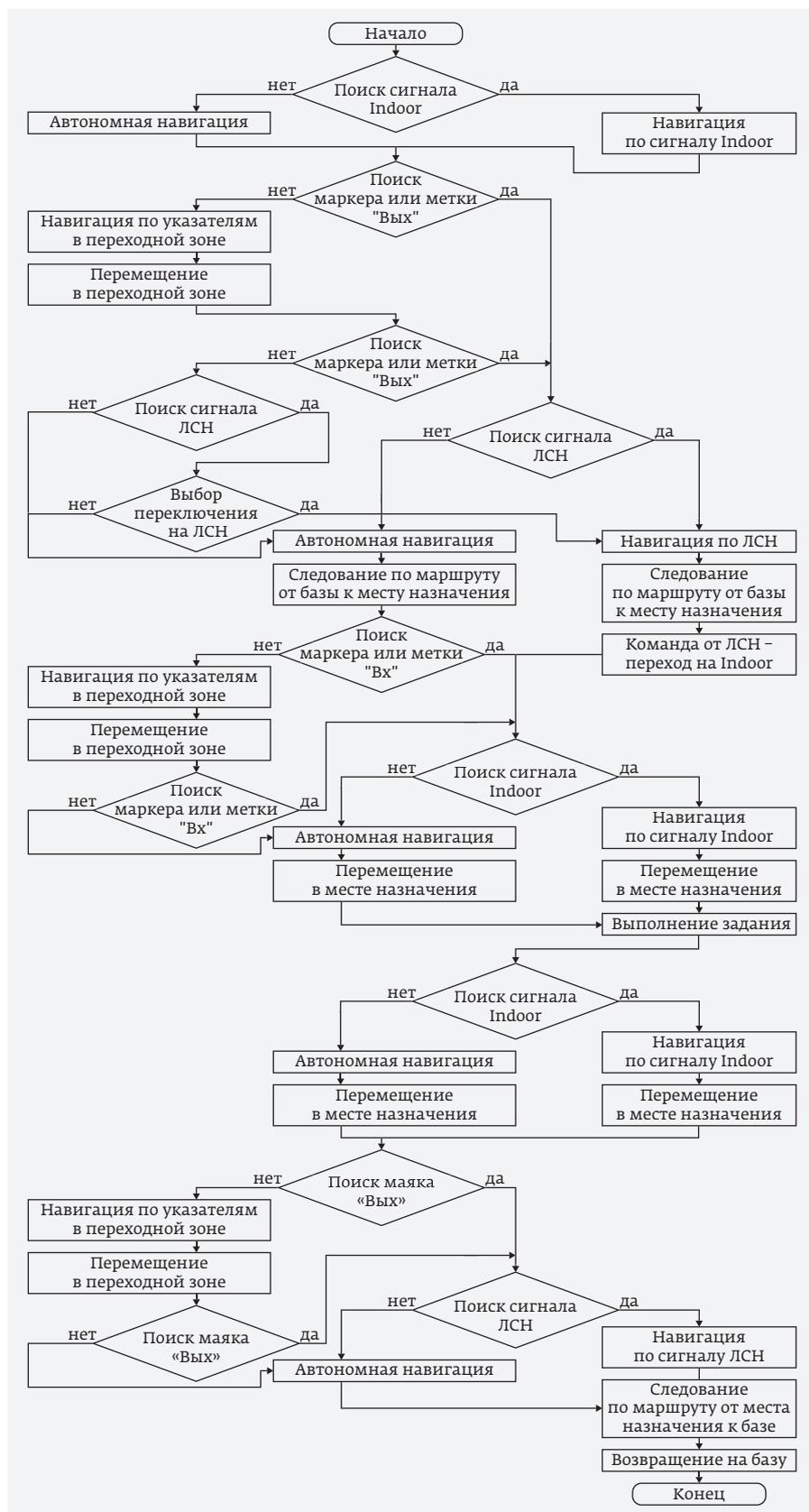


Рис. 1. Алгоритм движения абонента с портативным носимым устройством по маршруту

В разработанной АО «НИИМА «Прогресс» системе Indoor-навигации использованы технологии Bluetooth, Wi-Fi с поддержкой RTT (Round Trip Time – время приема-передачи). Абонентский терминал представляет собой портативное носимое устройство – смартфон или планшет со специальным программным обеспечением (приложением) NavyGo, доступным для загрузки в магазинах приложений типа RuStore, Google Play и т.д. [4, 5].

Аппаратный состав системы включает в себя абонентское устройство для навигации, сервер для обработки данных, устанавливаемые в помещении маяки и устройство сбора информации о картах (используется на этапе подготовки к развертыванию системы).

Система Indoor-навигации была использована при проведении Российского форума «Микроэлектроника 2023» (Федеральная территория «Сириус») для построения посетителями маршрута до искомым объектам, получения информации об экспонатах и ознакомления с деловой программой (рис. 2).

Между сервером и абонентским устройством осуществляется двухсторонний обмен данными. Информация, передаваемая абонентами на сервер, используется для загрузки карт, передаваемых на абонентское устройство, которое вычисляет собственные координаты, связывая карты с определенным положением относительно маяков, имеющих собственный уникальный номер. Текущие координаты отображаются с помощью визуального интерфейса на дисплее устройства.

Для работы данной системы Indoor-навигации необходимо наличие связи с сервером посредством беспроводных сетей Wi-Fi или GSM.

По данным, накопленным на сервере, возможно восстановить историю перемещений отдельных пользователей (рис. 3) и сформировать

цветовую диаграмму активности («тепловую карту»), наглядно демонстрирующую уровень активности посетителей форума (рис. 4).

Полученные данные о популярности тематических секций и посещаемости стендов отдельных экспонентов позволяют оптимизировать программу мероприятия и само выставочное пространство.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ

Дальнейшее развитие и совершенствование систем Indoor-навигации связано с необходимостью обеспечить функционирование в условиях отсутствия связи с сервером и выполнения обработки данных непосредственно в самом портативном носимом абонентском устройстве, в котором уже должен быть нейропроцессорный вычислитель.

В системе Indoor-навигации перспективно применение технологии UWB (Ultra-Wide Band – сверхширокая полоса), которая все чаще используется в беспроводной связи и навигации.

UWB представляет собой радиочастотную технологию, с шириной полосы радиочастотного канала более 500 МГц. Базирующиеся на этой технологии RTLS-системы (Real Time Location System – системы определения местоположения в режиме реального времени) характеризуются сантиметровой точностью определения местоположения. Главное преимущество этой технологии – возможность работы в помещениях со сложной геометрией и большим количеством помех. Чем выше частота сигнала, тем меньше погрешность определения местоположения, но при этом также уменьшается и радиус действия системы.

Главное различие между технологиями UWB, Bluetooth и Wi-Fi заключается в том, что при использовании UWB передача информации выполняется не модулированными синусоидальными волнами, а модулированными последовательностями импульсов с длительностью порядка наносекунды [6, 7].

Для оценки расстояния, в отличие от Bluetooth, в технологии UWB используется не уровень сигнала, а время его распространения от передатчика до приемника и обратно (ToF), а также метод RTT.



Рис. 2. Визуальный интерфейс приложения NavyGo для смартфона, использованного на форуме «Микроэлектроника 2023»: а – построение маршрута до интересующего объекта; б – информация об экспонентах; в – деловая программа

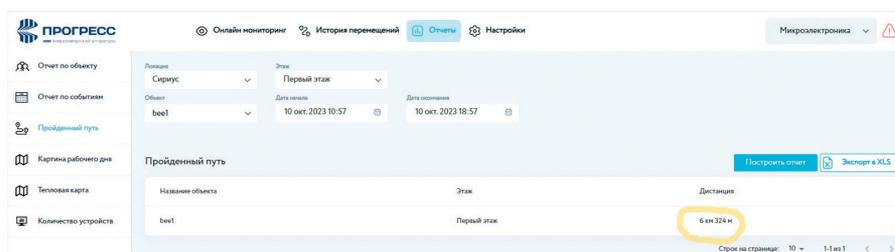


Рис. 3. Отчет с историей перемещений абонентов (пользователей)

В методе RTT для измерения дальности между приемопередатчиками ППА и ППБ, объект ППА посылает объекту ППБ пакет с запросом на измерение и фиксирует время его отправки. Объект ППБ после получения пакета с запросом отправляет пакет-подтверждение. По известной длительности аппаратных задержек и скорости распространения сигнала (в общем случае, являющейся константой) вычисляется дальность между объектами.

Дальность между приемопередатчиками определяется по выражению

$$D = \frac{c \cdot (T_3 - T_2 - T_1)}{2}, \quad (1)$$

где T_1 – время прихода запроса от ППА к ППБ; T_2 – длительность аппаратной задержки; T_3 – время прихода к ППА ответа от ППБ; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

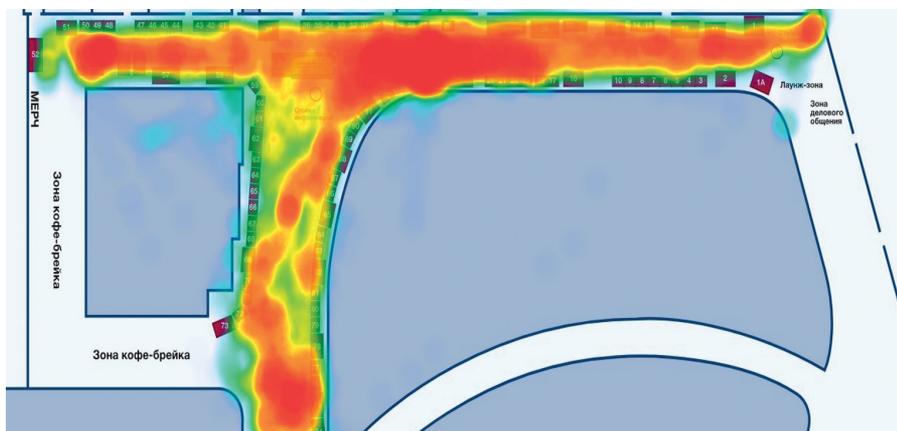


Рис. 4. Цветовая диаграмма – «тепловая карта», демонстрирующая уровень активности посетителей форума «Микроэлектроника 2023»: теплыми цветами выделены зоны высокой активности посетителей, а холодными – зоны с низкой активностью

В системах на базе Wi-Fi-технологии ранее также использовался метод RSSI, кроме него координаты абонента могут определяться дальномерным беззапросным методом путем решения трех уравнений вида

$$D_i^2 = (x_{bi} - x)^2 + (y_{bi} - y)^2, \quad (3)$$

где D_i – дальность до i -й базовой станции; x_{bi}, y_{bi} – координаты i -й базовой станции, $i=1, 2, 3$.

В стандарте Wi-Fi 802.11 az. Next Generation Positioning (NGP) для измерения дальности уже применяется метод ToF. Тем не менее технология Wi-Fi может обеспечить только дециметровую точность, что на порядок хуже, чем обеспечивают UWB-системы.

В методе RTT основным источником погрешности является нестабильность измерителей временных интервалов. Но при этом точность все равно будет выше, чем у применяемого в технологии Bluetooth метода RSSI, где дальность до маяка определяется из соотношения

$$P_{np} = P_0 - 10 \cdot \eta \cdot \log \frac{D_i}{D_0}, \quad (2)$$

где P_{np} – мощность сигнала i -го маяка на дальности D_i ; P_0 – мощность сигнала на калибровочной дальности D_0 ; η – коэффициент ослабления сигнала в среде распространения.

UWB-системы более устойчивы в условиях многолучевого распространения сигнала, часто наблюдаемого внутри помещений, так как короткие сигналы меньше подвержены искажениям из-за отражения радиоволн, по сравнению с сигналами Bluetooth или Wi-Fi.

Измерение расстояния методом ToF также может быть дополнено информацией об углах излучения и прихода сигнала (AoA и Angle of Departure – AoD), обеспечивающих дополнительную точность при определении местоположения абонента. Как и в технологии Bluetooth 5.1, для вычисления угла прихода радиосигнала, в приемнике абонентского устройства используется антенная решетка из нескольких антенн, разнесенных на базу известной длины.

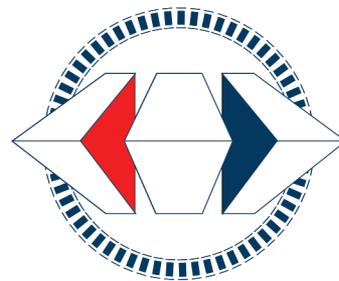
Более сложной задачей является обеспечение автономной навигации портативного носимого абонентского устройства.

Принцип счисления пути с требуемой погрешностью сложно реализовать в портативном носимом устройстве. Бесплатформенные навигационные системы (БИНС) с высокими точностными характеристиками имеют массу и габариты, не позволяющие их интегрировать в устройство типа смартфона или планшета, в которых используются инерциальные датчики на базе



Рис. 5. Отображение последовательных позиций абонента (1...3) на карте помещения визуальным интерфейсом смартфона при навигации по видеоданным

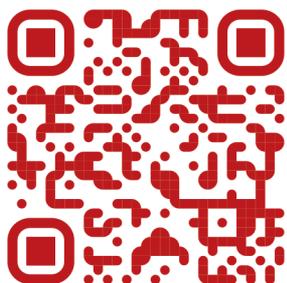
26–28 НОЯБРЯ 2024



РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННИК

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ-ВЫСТАВКА

**ПРОМЫШЛЕННАЯ ПОЛИТИКА:
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ
И КАДРОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ,
МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО
ДЕМОНСТРАЦИЯ ПЕРЕДОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ
КОММУНИКАЦИОННАЯ ПЛОЩАДКА
РАЗВИТИЯ ДЕЛОВЫХ СВЯЗЕЙ,
ПРЯМОГО КОНТАКТА
С ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ
ПАРТНЁРАМИ**



**ПРИНЯТЬ
УЧАСТИЕ**

СООРГАНИЗАТОРЫ:



**Минпромторг
России**



ПРАВИТЕЛЬСТВО
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ОПЕРАТОР ФОРУМА:



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ | КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»
PROMEXPO.EXPOFORUM.RU

микроэлектромеханических гироскопов (МЭМС), не обладающие высокой точностью. Одометр (датчик пути) может быть установлен только на колесном или гусеничном шасси.

С этой стороны, оптимальным вариантом выглядит использование информации от оптических датчиков, как в [2], но уже не в качестве основного средства навигационных данных, а в дополнение к радиочастотным системам.

Так как практически все современные модели смартфонов и планшетов имеют встроенные телекамеры, то может быть реализован метод визуальной одометрии. В рамках совершенствования системы Indoor-навигации в АО «НИИМА «Прогресс» была отработана автономная навигация в помещении по видеоданным, полученным монокулярной телекамерой смартфона (рис. 5).

Навигация может быть обеспечена алгоритмами одновременной локализации и построения карты (Simultaneous localization and mapping – SLAM), реализованными с помощью нейронной сети. Для реализации алгоритма SLAM используется рекуррентная сверточная нейронная сеть (Recurrent Convolutional Neural Networks, RCNNs) – модель глубокого обучения, широко применяемая в техническом зрении.

ResNet решает проблему затухающего градиента, используя блоки с остаточными связями. Основной особенностью данной нейронной сети является концепция пропущенных соединений, где вывод одного слоя прибавляется к выводу более глубокого слоя, что позволяет градиентам эффективно передаваться между слоями во время обучения. Таким образом можно обучать глубокие сети (до нескольких сотен слоев) без потери производительности.

Для визуальной одометрии был выбран надежный и распространенный алгоритм ORB-SLAM, к преимуществам которого относятся:

- хорошая точность позиционирования;
- открытый исходный код;
- использование обратной связи;
- переобучение карт;
- наличие облегченного режима навигации с использованием карт, в котором допускается отключение обучения карт.

Разработан способ непрерывной навигации абонента с портативным носимым устройством типа смартфона или планшета. В результате обеспечивается непрерывная навигация абонента при переходе из зоны устойчивого приема ЛСН на открытой местности в экранирующее сооружение с установленной системой Indoor-навигации и обратно, при котором не происходит

потери координат, не накапливается ошибка за время прохождения маршрута и исключается неконтролируемое переключение между сигналами систем Indoor-навигации и ЛСН.

Принципиально возможен и другой подход к решению этой задачи, например, с помощью интегрального фильтра Калмана, в который поступают данные от приемников ЛСН и маяков Indoor-навигации. Кроме того, актуальны методы решения технических проблем, возникающих при развертывании оборудования на реальных объектах: навигация между этажами зданий, привязка маяков к координатам в помещении, устойчивость системы при отказе части маяков и др. Подробное рассмотрение этих вопросов требует отдельных публикаций.

На сегодняшний день дальнейшее совершенствование систем Indoor-навигации связано с разработкой портативных носимых абонентских устройств с нейропроцессорным вычислителем, использованием технологии UWB и методами визуальной одометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Старовойтов Е., Скиба Е.** Непрерывная навигация внутри и снаружи помещений для роботизированной логистики // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2024. № 5. С. 132–137. DOI: 10.22184/1992-4178.2024.236.5.132.137.
2. Патент RU2734553 С1. Ксилухин А.В., Сидоров А.В., Абрамов Е.В. / ООО «ТрансИнжКом» Система комбинированного трекинга. Заявка 2019123263, приоритет от 2019.07.24. Публ. 2020.10.20.
3. Способ навигации с интеграцией систем и средств обеспечения сквозного позиционирования повышенной точности и устойчивости к помехам. Заявка на изобретение № 2023135430. Приоритет от 08.12.2023 / АО «НИИМА «Прогресс», АО «ГЛОНАСС» / И.Л. Корнеев, К.Ю. Борисов, З.К. Кондрашов, А.В. Григорьев, В.В. Юров, А.В. Александров, А.С. Кузнецов, В.С. Королев, Е.А. Анищенко, Е.И. Старовойтов.
4. **Скиба Е., Старовойтов Е.** Технология BLE. Встретимся внутри // Ruбeж. <https://ru-bezh.ru/evgeniy-skiba/51140-tehnologiya-ble-vstretimsya-vnutri>
5. **Скиба Е.** Пилотный проект навигации по выставке на форуме «Микроэлектроника 2023» // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2023. № 10. С. 16–19. DOI: 10.22184/1992-4178.2024.231.10.16.19.
6. **Алексеев А.** Новый стандарт IEEE 802.15.4z для сетей сверхширокополосной связи – UWB // Беспроводные технологии. 2019. № 3. С. 22–26.
7. **Данель Е.** Новые горизонты микролокации: Bluetooth 5.1, UWB и Wi-Fi 802.11az // Беспроводные технологии. 2021. № 2. С. 28–30.

XXVIII МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

INTERPOLITEX



СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА

06–08 НОЯБРЯ 2024
МОСКВА • ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР» • ПАВИЛЬОН 1

ОРГАНИЗАТОР



INTERPOLITEX.RU/ANTITERROR