

УДК 004.8

В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный, В.И. Люлько, П.А. Цыбанов
**ВОЗМОЖНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВНУТРИ
ПОМЕЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ BLUETOOTH УСТРОЙСТВ**

*Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток, Россия*

Работа посвящена проблеме навигации в условиях недоступности сигнала спутниковых средств (GPS, Глонасс). В этом случае для определения местоположения объектов используются альтернативные источники навигационной информации, например, Bluetooth устройства, имеющие целый ряд преимуществ. Это возможность построения инфраструктуры на базе недорогого и распространённого оборудования, не требующего специальных профессиональных навыков персонала и возможность практически произвольного конфигурирования датчиков на стенах помещения в силу их малого размера и автономности. Передаваемые Bluetooth устройством данные содержат довольно ёмкую информацию о его работе. Для решения задачи навигации наиболее важными элементами данных являются уникальный идентификатор наблюдаемого устройства и относительный уровень мощности принимаемого от него сигнала. Уровень принимаемого сигнала связан с дальностью «объект-датчик» известным логарифмическим соотношением. Особенности программной реализации рассматриваемой задачи с возможностью накопления и совместной обработки данных измерений за некоторый период времени делают возможным её сведение к методу наименьших квадратов. Такое представление позволяет априорно оценить характерную точность определения координат объекта при различных конфигурациях системы датчиков, используемых для навигации внутри помещения, что особенно важно на этапе проектирования соответствующей информационно-навигационной системы. Работа сопровождается результатами вычислительных и натурных экспериментов.

Ключевые слова: информационная система, навигация внутри помещений, маячная система, Bluetooth, координаты, скорость, метод наименьших квадратов.

Введение. Ещё два десятилетия назад задачи навигации решались почти исключительно в специальных и отраслевых интересах (авиация, судоходство). После появления и массового вхождения в обиход современных мобильных устройств (смартфоны) произошёл качественный скачок и в настоящее время интерес к навигационным задачам имеется со стороны очень широкого круга бытовых потребителей.

Внутри помещений не всегда доступны традиционные источники навигационных данных – спутниковые навигационные системы второго поколения (GPS, Глонасс). В этом случае для определения местоположения объектов используются альтернативные источники навигационной информации: инерциальные навигационные средства (акселерометры, гироскопы), точки доступа в интернет Wi-Fi, устройства

передачи данных Bluetooth, датчик давления, магнитометр и т.п. Их данные могут использоваться как по отдельности, так и совместно, в зависимости от решаемой задачи.

К настоящему времени навигация внутри помещений оформилась в самостоятельный класс задач [1]. С точки зрения информационных технологий эти задачи носят комплексный характер. Во-первых, они требуют разработки особых математических моделей и алгоритмов фундаментального характера для обеспечения навигационной компоненты. Во-вторых, для их реализации в виде информационных сервисов необходима разработка программных комплексов специальной архитектуры, учитывающей особенности программно-аппаратных платформ мобильных устройств.

Несмотря на повышенный интерес к задаче навигации внутри помещений со стороны исследователей и разработчиков, можно сказать, что к настоящему времени пока не выработаны стандартные методы её решения; это создаёт перспективы для инноваций. Среди имеющихся разработок в области навигации внутри помещений можно отметить следующие хорошо зарекомендовавшие себя подходы.

Использование данных инерциальных датчиков. В этом случае с помощью гироскопов и акселерометров мобильного устройства решаются различные варианты задачи инерциальной навигации [2]. Достоинством этого подхода является автономность и отсутствие привязки к внешней инфраструктуре. Вместе с тем, устройствам бытового назначения инерциальные измерения доступны лишь с большой погрешностью. Это делает указанный подход практически полезным только для специальных устройств, оснащённых навигационными датчиками высокой точности.

Использование данных Wi-Fi/Bluetooth. Первый способ использования таких данных – решение задачи типа трилатерации. В этом случае исходными данными для оценки координат наблюдаемого объекта служат измерения дальностей «объект-датчик», при этом дальность оценивается по уровню принимаемого мобильным устройством сигнала [3]; такой способ аналогичен используемым, например, в гидроакустике [4]. Второй способ – определение местоположения объекта путём сравнения измеряемых уровней сигнала от окружающих датчиков с заранее измеренными значениями, привязанными к карте помещения (карта уровня сигналов, радиоотпечаток) [5, 6]. К достоинствам подхода можно отнести возможность использования уже развёрнутых сетей передачи данных (Wi-Fi). Недостатком является высокая погрешность измерения уровня сигнала, дискретность данных карт уровня сигналов, принципиально ограничивающая точность навигации и необходимость предварительной калибровки и настройки (обучения) системы.

Имеются сведения о попытках разработки других подходов, например, системы оптического типа, когда сравниваются данные сканирования помещения и изображения с камеры смартфона [7] или системы, основанной на навигации по магнитному полю с помощью компаса смартфона [8], а, также, комбинирования в одной системе позиционирования нескольких подходов одновременно [9, 10].

Использование для задач навигации внутри помещений Bluetooth устройств имеет целый ряд преимуществ. Прежде всего, это возможность построения инфраструктуры на базе недорогого и распространённого оборудования, не требующего специальных профессиональных навыков персонала и возможность практически произвольного конфигурирования датчиков на стенах помещения в силу их малого размера и автономности. Кроме того, дальность видимости Bluetooth устройств невелика, а их сигнал практически не проходит сквозь капитальные стены, что полностью решает «проблему этажа».

В настоящей работе рассматривается модель задачи навигации внутри помещений по данным Bluetooth устройств, основанная на измерениях уровня сигнала, интерпретирующего дальность «объект-датчик». Целью работы является оценка характерной точности определения координат объекта в различных навигационных ситуациях и перспектив реализации подхода для тех или иных практических приложений.

Материалы и методы.

Передаваемые Bluetooth устройством данные содержат довольно ёмкую информацию о его работе [11]. С точки зрения обсуждаемой задачи наиболее важными элементами данных являются уникальный идентификатор наблюдаемого устройства и относительный уровень мощности принимаемого от него сигнала (единицей измерения, используемой в смартфонах, обычно служит дБм). Уровень принимаемого сигнала связан с дальностью «объект-датчик» следующим известным соотношением [12]:

$$u = u_* - 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d/d_*).$$

Здесь u – уровень сигнала, принимаемого мобильным устройством (объектом) на расстоянии d от Bluetooth устройства (датчика), u_* – уровень сигнала, измеренный на расстоянии d_* от устройства, n – коэффициент, учитывающий распространение сигнала в окружающей среде. Значения параметров d_* и u_* – калибровочные расстояние и уровень сигнала – являются техническими характеристиками конкретного устройства, значение коэффициента затухания n также считается известным. В принципе, эти значения могут быть определены при калибровке устройства.

Введём правую ортогональную систему координат x, y , связанную с помещением. Пусть имеется N датчиков, «видимых» мобильным устройством. Дальность «объект-датчик» связана с координатами объекта и датчика следующим образом:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, i = \overline{1, N},$$

где x, y – координаты объекта, x_i, y_i – координаты i -го датчика.

Уравнения измерений будут иметь вид:

$$u_i(t_k) = u_{*i} - 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\sqrt{(x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2} / d_{*i} \right) + \eta_i(t_k), \quad (1)$$

где $u_i(t_k)$ – уровень сигнала i -го датчика, принимаемого на объекте в момент времени t_k , x_i, y_i – координаты i -го датчика, $x(t_k), y(t_k)$ – координаты объекта в момент времени t_k , u_{*i} и d_{*i} – калибровочные значения уровня сигнала и расстояния i -го датчика, $\eta_i(t_k)$ – инструментальная погрешность измерения i -го датчика, отнесённая к моменту времени t_k , $k = \overline{1, M}$, M – число измерений от каждого датчика.

Положим, что движение объекта описывается следующей кинематической моделью:

$$\begin{aligned} x(t_{k+1}) &= x(t_k) + v_x(t_k)(t_{k+1} - t_k), \\ y(t_{k+1}) &= y(t_k) + v_y(t_k)(t_{k+1} - t_k). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $x(t_k), y(t_k)$ – координаты объекта в момент времени t_k , $v_x(t_k), v_y(t_k)$ – компоненты вектора скорости объекта.

Линеаризация уравнения (1) приводит его к виду:

$$\begin{aligned} \delta u_i(t_k) &= \frac{-10 \cdot n \cdot d_{*i} \cdot (x(t_k) - x_i)}{\ln(10) \cdot ((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} \delta x(t_k) + \\ &+ \frac{-10 \cdot n \cdot d_{*i} \cdot (y(t_k) - y_i)}{\ln(10) \cdot ((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} \delta y(t_k) + \eta_i(t_k), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\delta x(t_k), \delta y(t_k)$ – погрешности априорных представлений о координатах объекта, $\delta u_i(t_k)$ – невязка измерения.

Особенности программной реализации рассматриваемой задачи с возможностью накопления и совместной обработкой данных измерений за некоторый период времени делают возможным её сведение к методу наименьших квадратов. Запишем уравнения (3) с учётом модели эволюции координат объекта (2):

$$\begin{aligned} \delta u_i(t_k) &= \frac{-10 \cdot n \cdot d_{*i} \cdot (x(t_k) - x_i)}{\ln(10) \cdot ((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} \delta x(t_*) + \\ &+ \frac{-10 \cdot n \cdot d_{*i} \cdot (x(t_k) - x_i)}{\ln(10) \cdot ((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} (t_k - t_*) \delta v_x(t_*) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{-10 \cdot n \cdot d_{*i} \cdot (y(t_k) - y_i)}{\ln(10) \cdot ((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} \delta y(t_*) + \\
 & + \frac{-10 \cdot n \cdot d_{*i} \cdot (y(t_k) - y_i)}{\ln(10) \cdot ((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} (t_k - t_*) \delta v_y(t_*) + \eta_i(t_k),
 \end{aligned}$$

или, в общем случае:

$$\delta \mathbf{Z} = \mathbf{H} \delta \mathbf{s}(t_*) + \boldsymbol{\xi}. \quad (4)$$

Здесь $\delta \mathbf{Z}$ – полный вектор (длины $M \times N$) невязок измерений на интервале наблюдения, $\delta \mathbf{s}(t_*)$ – вектор погрешностей априорных представлений о состоянии системы (координатах и скоростях объекта) в выбранный момент времени t_* , \mathbf{H} – матрица коэффициентов, $\boldsymbol{\xi}$ – вектор приведённых погрешностей измерений. Целью решения задачи (4) является оценка вектора $\mathbf{s}(t_*)$ по имеющимся измерениям уровней сигнала $u_i(t_k)$. Эта оценка может быть выполнена, например, путём сведения задачи к системе линейных алгебраических уравнений:

$$\mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \delta \mathbf{Z} = \mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H} \delta \mathbf{s}(t_*) \quad (5)$$

и её решения известными способами. Здесь $\mathbf{Q} = \text{mean}[\boldsymbol{\xi} \boldsymbol{\xi}^T]$ – ковариационная матрица случайного вектора $\boldsymbol{\xi}$, она определяется свойствами инструментальных погрешностей измерений $\eta_i(t_k)$ и считается известной. Матрица $\mathbf{D} = (\mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H})^{-1}$ определяет при этом дисперсию погрешности оценки вектора состояния $\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*)$, так что $\mathbf{D} = \text{mean}[(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))^T]$. mean – оператор математического ожидания. Как показывают приведённые ниже результаты исследования, значения соответствующих коэффициентов матрицы \mathbf{D} позволяют оценить характерную точность определения координат объекта при различных конфигурациях системы датчиков, используемых для навигации внутри помещения.

Результаты численного моделирования.

Численное исследование задачи проводилось для следующих значений параметров: инструментальная погрешность измерений датчиков имеет нормальное распределение с дисперсией 25дБм²; частота обновления данных об уровне сигнала равна 0.07с, что характерно для современных смартфонов; количество измерений M от каждого датчика равно 28, что соответствует длине интервала наблюдения приблизительно 2 секунды.

На Рисунке 1 показано моделируемое расположение датчиков; имитируется типичная ситуация холла или комнаты размером 10×10м.

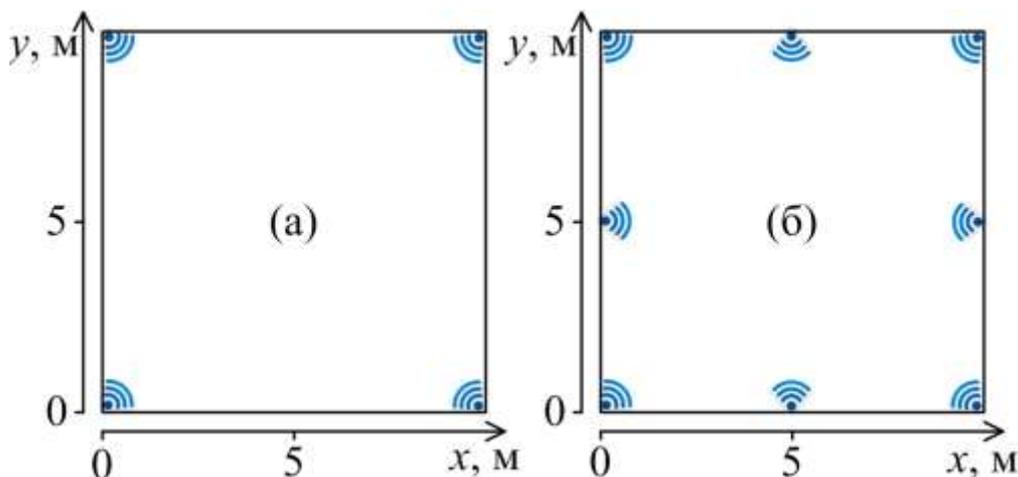


Рисунок 1. Варианты расположения датчиков в помещении типа «холл» или «комната»

Датчики «наклеены» на стены в различных конфигурациях: в углах комнаты (Рисунок 1а), в углах и на стенах комнаты ((Рисунок 1б). При этом считается, что датчики расположены в одной плоскости с движущимся объектом (или достаточно близко к этой плоскости), что даёт возможность ограничиться только двумерным вариантом модели рассматриваемой задачи.

Будем рассматривать два варианта вектора состояния $\mathbf{s}(t_k)$: с компонентами, включающими координаты и скорости объекта (кинематическая задача) и с компонентами, включающими только координаты (статическая задача).

На Рисунке 2 показаны вычисленные согласно (5) значения средней погрешности оценивания координат объекта σ_{xy} в кинематической задаче при нахождении (движении) объекта в комнате (Рисунок 1).

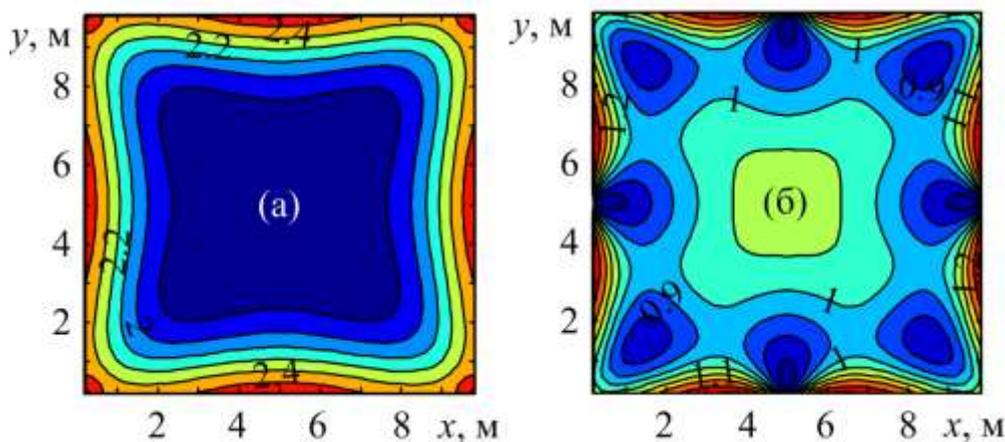


Рисунок 2. Погрешность определения координат в помещении типа «комната» при оценке координат и скоростей объекта

Рисунок 2а соответствует конфигурации датчиков, показанной на Рисунке 1а, а Рисунок 2б – конфигурации Рисунка 1б. Величина σ_{xy} принимает значения от 1.9 до 2.5 метров для случая четырёх датчиков и от 0.9 до 1.2 метра для комнаты с восемью датчиками.

Аналогичные данные приведены на Рисунке 3 – показаны значения величины σ_{xy} в статической задаче. Видно, что в последнем случае они примерно в два раза меньше, чем в кинематической задаче.

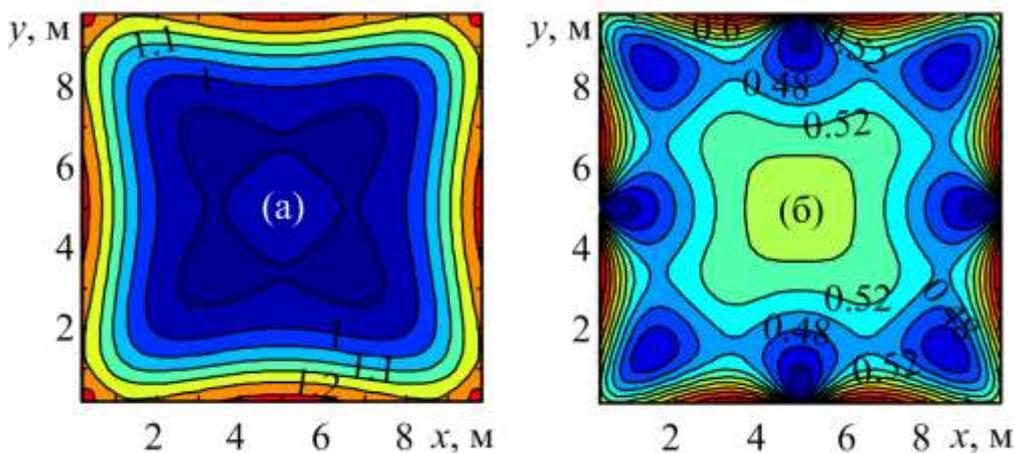


Рисунок 3. Погрешность определения координат в помещении типа «комната» при оценке только координат объекта

В целом ожидаемую погрешность оценивания координат следует признать приемлемой для большого числа практических приложений.

Результаты натуральных экспериментов.

При проведении натуральных исследований использовались Bluetooth маяки SKYLAB Beacon VG01 [13] и мобильный телефон Samsung Galaxy S8 на платформе Android. На Рисунке 4 показан результат оценки координат объекта в помещении типа «комната» при решении кинематической задачи.

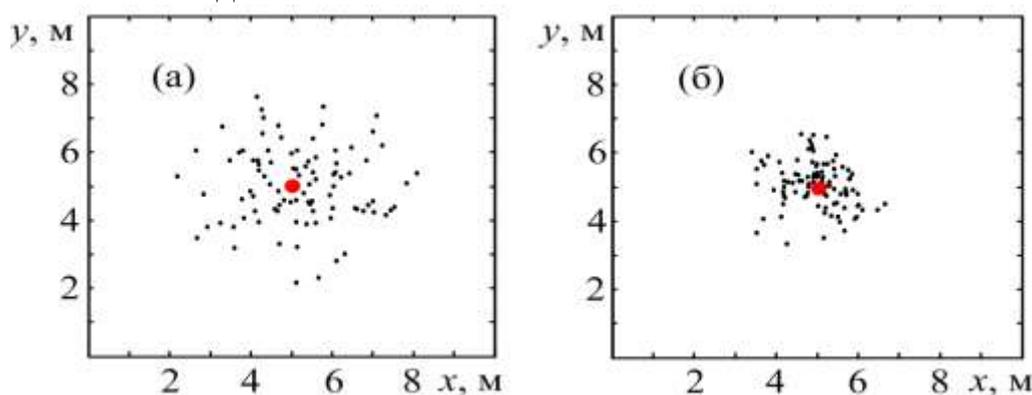


Рисунок 4. Результаты оценки координат объекта в помещении типа «комната» при оценке координат и скоростей объекта

Точками показаны оценки местоположения объекта (100 точек – 100 последовательных решений задачи), при этом объект находился в середине комнаты (красный кружок). Рисунок 4а соответствует случаю четырёх маяков по углам комнаты (Рисунок 1а), Рисунок 4б – случаю восьми маяков (Рисунок 1б).

На Рисунке 5 показан аналогичный результат оценки координат объекта при решении статической задачи.

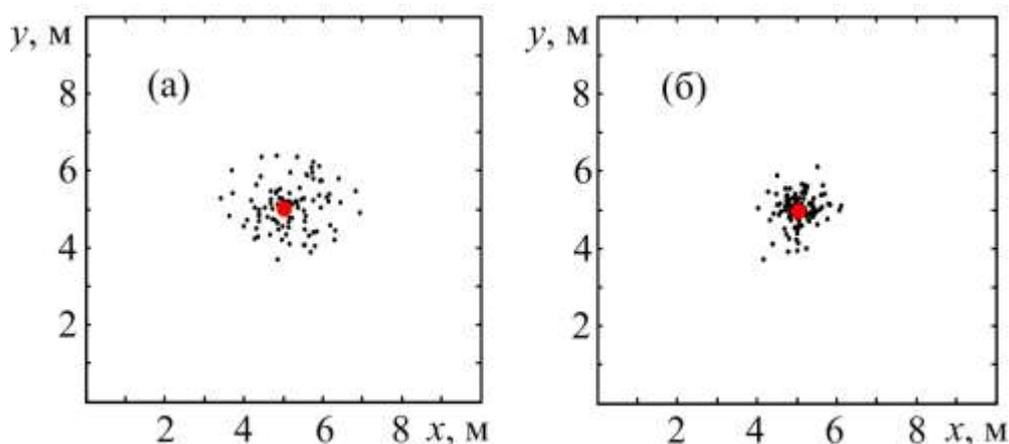


Рисунок 5. Результаты оценки координат объекта в помещении типа «комната» при оценке только координат объекта

Обсуждение.

Из результатов проведённых испытаний можно сделать вывод о том, что погрешность оценки координат объекта в натурном эксперименте полностью соответствует предсказанной расчётами. Для этого достаточно соотнести данные Рисунков 2 и 4, 3 и 5; видно, что погрешность оценки координат укладывается в круг с радиусом $2\sigma_{xy}$. Это подтверждает возможность использования таких оценок при проектировании навигационной системы рассматриваемого типа.

Точность решения статической задачи существенно выше (примерно в 2 раза), чем кинематической. С другой стороны, игнорирование в модели задачи скорости объекта при его реальном движении приводит к её неудовлетворительному решению. Поэтому при разработке приложения, осуществляющего навигацию мобильного устройства, следует обязательно реализовать идентификацию модели движения. Для покоящихся на интервале наблюдения объектов ограничиваться статической моделью задачи, для движущихся – использовать кинематическую модель.

Заключение.

Результаты настоящего исследования позволяют оптимистично оценить возможность построения навигационной системы на основе Bluetooth маяков с использованием классических модельных представлений маячных дальномерных систем. При характерном расстоянии между маяками и объектом 5м реально достижимая точность определения координат объекта составляет 1-2м, что достаточно для традиционных задач навигации внутри зданий (построение пути, контекстная реклама). Дальнейшее повышение точности навигации может быть связано с уменьшением случайной компоненты инструментальных ошибок измерений путём идентификации модели сигнала и применения различных алгоритмов фильтрации [14, 15]. Улучшение в перспективе точности навигации до значений порядка 0.5м позволило бы качественно расширить возможный круг решаемых задач.

Следует также отметить, что построение навигационной системы рассматриваемого типа всегда связано с привязкой датчиков к местной локальной системе координат (выставкой системы). Такая привязка может быть осуществлена различными известными способами, в том числе описанными в работах авторов, опубликованных ранее [15-17].

ЛИТЕРАТУРА

1. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://ipin-conference.org/> (01.04.2018).
2. Дэвидсон П., Киркко-Яаккола М., Коллин Ю.З, Такала Я. Навигационный алгоритм с использованием планов зданий и данных автономных датчиков // Гироскопия и навигация. – 2015. – №1. – с. 29-42.
3. Щёкотов М.С., Кашевник А.М. Сравнительный анализ систем позиционирования смартфонов в помещениях // Труды СПИИРАН. – 2012. – №4. – с. 459-471.
4. Матвиенко Ю.В., Ваулин Ю.В., Каморный А.В. Градуировка навигационных средств подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – №1. – с. 16-22.
5. Мурашко И.А., Храбров Д.Е. Методика локального позиционирования на основании Wi-Fi-сети университета // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2: Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, Вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2015. – №2. – с. 119-127.
6. Ассур О.С., Филаретов Г.Ф. Разработка комплексного метода позиционирования объектов по данным беспроводных сетей Wi-Fi и устройств BLE (Bluetooth Low Energy) // Известия Института

- инженерной физики. – 2015. – №2. – с. 2-10.
7. Yang S.H., Jeong E.M., Kim D.R., Kim H.S., Son Y.H., Han S.K. (2013). Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication // *Electronics Letters*. – 2013. – №49(1). – p. 54-56.
 8. Magnetic field anomalies [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.gizmag.com/magnetic-anomaly-indoor-positioning/23253/> (01.04.2018).
 9. Петрова О.А., Табунщик Г.В., Ван Мероде Д. Метод определения текущего расположения в системах позиционирования и навигации внутри помещения // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2017. – №25. – с. 270-278.
 10. Retscher G. Test and Integration of Location Sensors for a Multi-Sensor Personal Navigator // *Journal of Navigation*. – 2007. – Vol. 60. – №1. – p. 107-117.
 11. Протоколы Bluetooth [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/Wireless/bluetooth/7.htm> (01.04.2018)
 12. Motley A.J., Keenan J.M.P. Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz // *Electronics Letters*. – 1988. – Vol. 24. – №12. – p. 763-764.
 13. Skylab Beacon virgo|beacon for indoor position [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.skylabmodule.com/beacon-virgo/> (01.04.2018)
 14. Казаков Е.Н. Разработка и программная реализации алгоритма оценки уровня сигнала в сети Wi-Fi // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2016. – №1. – с. 13.
 15. Глотова Т.В. Решение задачи рассеяния электромагнитных волн внутри помещения на основе интегро-параболического подхода // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2016. – №1. – с. 4.
 16. Grinyak V.M., Devyatisil'nyj A.S. Dynamic adjustment of multiposition observing system with respect to trajectory measurements // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – 1999. – Vol. 38. – №1. – p. 124-130.
 17. Гриняк В.М., Гриняк Т.М., Иваненко Ю.С. Динамическая выставка многопозиционной системы наблюдения // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2017. – №3. – с. 12.
 18. Гриняк В.М., Лаврушина Е.Г., Богданова О.Б. Выставка многопозиционной системы наблюдения по траекторным измерениям // *Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса*. – 2017. – №4. – с. 188-200.

V.M. Grinyak, A.S. Devyatisilnyi, V.I.Lulko, P.A. Tsibanov
**INDOOR POSITIONING SYSTEM BASED ON BLUETOOTH
BEACONS**

*Vladivostok State University of Economics and Service
Institute of Automation and Signal Processes FEBRAS*

The paper is devoted to research of possibility to use Bluetooth devices for indoors navigation. Relying on alternative measurements such as Wi-Fi network, onboard accelerometers, Bluetooth devices are vastly used to solve positioning and navigation problems when there are limitations to use global positioning satellite systems (such as GPS). Recently the indoors navigation became a stand-alone subclass of the research problems with subset of developed math models and the implementation hardware. Even though there is a lot of interest in the solution of the problem, there are still no standard approach. Due to the accuracy limitations of the broadly available mobile devices applying inertial navigation approach would dramatically reduce variety of the hardware it could be used. Relying on available Wi-Fi networks for evaluation of navigation parameters also has accuracy limitations. However, using Bluetooth signal considered as way prospective for solving navigation problems. Due to the small size, relatively low prices of Bluetooth transmitters and signal features (indoors walls and bulkheads are not transparent) it is possible to deploy special indoors infrastructure for navigation purposes. The paper concludes that nature of the measurement available for Bluetooth signals is applicable for indoors accurate enough navigation for typical distances "object-beacon" in the range not more than 5-7 meters.

Keywords: information system, indoor navigation, beacons, Bluetooth, position, velocity, least squares method.

REFERENCES

1. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation [Web] <http://ipin-conference.org/> (01.04.2018).
2. Davidson P., Kirkko-Jaakkola M., Collin J., Takala J. Navigation Algorithm Combining Building Plans with Autonomous Sensor Data // Gyroscopy and Navigation. – 2015. – Is.3. – p. 188-196.
3. Shchekotov M., Kashevnik A. Comparative Analysis of Indoor Positioning Systems for Smartphones // Proc. FRUCT Conf. – 2012. – p. 43-48.
4. Matvienko Yu.V., Vaulin Yu.V., Kamornyy A.V. Calibration for Underwater Robotic Vehicle's Navigation // Podvodnye issledovaniyai i robototohnika. – 2015. – №1. – p. 16-22.
5. Murashko I.A., Khrabrov D.E. Methods of local positioning based on Wi-Fi-network of university // Vesnik Grodzenskaga dzjarzhaŭnaga ŭniversitjeta imja Janki Kupaly. Seryja 2: Matjematyka. Fizika. Infarmatyka, Vylichal'naja tjechnika i kiravanne. – 2015. – №2. – p. 119-127.
6. Assur O.S., Filaretov G.F. Razrabotka kompleksnogo metoda pozicionirovanija ob#ektov po dannym besprovodnyh setej Wi-Fi i ustrojstv

- BLE (Bluetooth Low Energy) // Izvestija Instituta inzhenernoj fiziki. – 2015. – №2. – p. 2-10.
7. Yang S.H., Jeong E.M., Kim D.R., Kim H.S., Son Y.H., Han S.K. (2013). Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication // Electronics Letters. – 2013. – №49(1). – p. 54-56.
 8. Magnetic field anomalies [Web] <http://www.gizmag.com/magnetic-anomaly-indoor-positioning/23253/> (01.04.2018).
 9. Petrova O., Tabunshchyk G., Van Merode D. Method for Location Detection in Indoor Navigation Systems // Jelektrotehnicheskie i komp'yuternye sistemy. – 2017. – №25. – p. 270-278.
 10. Retscher G. Test and Integration of Location Sensors for a Multi-Sensor Personal Navigator // Journal of Navigation. – 2007. – Vol. 60. – №1. – p. 107-117.
 11. Bluetooth [Web] <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/Wireless/bluetooth/7.htm> (01.04.2018)
 12. Motley A.J., Keenan J.M.P. Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz // Electronics Letters. – 1988. – Vol. 24. – №12. – p. 763-764.
 13. Skylab Beacon virgo|beacon for indoor position [Web] <http://www.skylabmodule.com/beacon-virgo/> (01.04.2018)
 14. Kazakov E.N. the developing and software analysis evaluation algorithm of the level of signal of Wi-Fi // Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii. – 2016. – №1. – p. 13.
 15. Glotova T.V. The solution of the problem of scattering of electromagnetic waves indoors on the basis of the integro-parabolic approach // Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii. – 2016. – №1. – p. 4.
 16. Grinyak V.M., Devyatisil'nyj A.S. Dynamic adjustment of multiposition observing system with respect to trajectory measurements // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 1999. – Vol. 38. – №1. – p. 124-130.
 17. Grinyak V.M., Grynyak T.M., Ivanenko Y.S. Dynamic Adjustment of Multiposition Observing System // Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii. – 2017. - №3. – p. 12.
 18. Grinyak V.M., Lavrushina E.G., Bogdanova O.G. Adjustment of multiposition observing system with respect to trajectory measurements // The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service, 2017, Vol. 9, No 4, pp. 188–200.