

УДК 004.8

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.023](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.023)

Позиционирование в трехмерном пространстве внутри помещений по данным Bluetooth-маяков

В.М. Гриняк

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса», Владивосток, Российская Федерация

Резюме: Работа посвящена проблеме определения местоположения внутри помещений в тех случаях, когда сигнал спутниковых средств (GPS, Глонасс) недоступен или ограничен. В этом случае для определения координат используют другие источники навигационной информации. К ним относятся инерциальные навигационные средства (гироскопы, акселерометры), устройства для беспроводной передачи данных Wi-Fi и Bluetooth, магнитометр, датчик атмосферного давления, видеокамера и др. В настоящее время системы позиционирования внутри помещений на основе Bluetooth и Wi-Fi (по отдельности или совместно) получили наибольшее распространение. Использование для позиционирования Bluetooth маяков имеет целый ряд преимуществ. Самыми значимыми являются возможность произвольного размещения маяков из-за их автономности и малых размеров и возможность использования недорогого и распространённого оборудования, работа с которым не требует привлечения узких, редких и высокооплачиваемых специалистов. В статье рассматривается задача позиционирования объекта в трёхмерном пространстве по данным Bluetooth устройств, расположенных в помещении и образующих многопозиционную маячную систему наблюдения. Отмечается, что для успешной работы такой системы необходимо заранее оценивать характерную погрешность оценки координат позиционируемых объектов и при необходимости изменять конфигурацию маяков. Предлагается модельная интерпретация задачи позиционирования в виде системы алгебраических линейных уравнений. Такое представление позволяет строить априорные теоретические оценки погрешности определения координат объекта, определять области пространства, где точность позиционирования недостаточна. В работе приводятся данные расчётов ожидаемой точности решения задачи в различных характерных ситуациях и результаты натуральных экспериментов, подтверждающих расчёты. В целом исследование оптимистично оценивает перспективы решения 3D задач позиционирования внутри помещений с помощью Bluetooth маяков.

Ключевые слова: информационная система, позиционирование внутри помещений, маячная система, Bluetooth, определение местоположения, метод наименьших квадратов.

Для цитирования: Гриняк В.М. Позиционирование в трехмерном пространстве внутри помещений по данным Bluetooth-маяков. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/Grinyak_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.023

3D indoor positioning system based on Bluetooth beacons

V.M. Grinyak

Federal State State-financed Educational Institution of Higher Education “Vladivostok State University of Economics and Service”, Vladivostok, Russian Federation

Abstract: This paper devoted to research of indoors navigation problems under poor or insufficient quality of satellite navigational data environment. The problem of object positioning in 3D space by Bluetooth devices located indoors forming a multi-position tracking system is considered in this research. Emphasized that in order to succeed for such system it is required to pre-estimate distinctive accuracy. The proposed model interpretation of the positioning problem as the system of linear equations. The classic model interpretation for method of least squares is used for resolution. General problem of linearization around reference resolution is the locality of its features. There are three concepts of problems solvability, such as fundamental solvability (observability), solvability in conditions of instrumental measurement errors and solvability under conditions of finite accuracy of computation on a computer. The first aspect of solvability is interpreted by the completeness of the rank of the corresponding system of linear algebraic equations, the second and third ones represents by the conditionality of the problem and the convergence of the iterative estimation procedure. The conducted experiments show that for the positioning problem the attributes of the linearized model are accurate enough to represent the original nonlinear problem. Such interpretation allows to build theoretical accuracy estimation priors for object coordinates evaluations and to identify the areas with insufficient positioning accuracy. In this paper there are results of expected accuracy evaluation for various system patterns with full-scale experiments proving the theoretical calculations. Experiments for problems with using SKYLAB Beacon VG01 Bluetooth transmitters and smartphone HUAWEI WAS-LX1 are presented and confirmed that math model with linear approximation defined by authors is usable for solving indoors navigation problems using Bluetooth signal. So, for good enough quantity and appropriate location of the tracks the achievable positioning accuracy could be as good as 0.2-0.3 meters for all three coordinates. Such accuracy allows to navigate small hovering objects such as drones. In general, it looks promising to use Bluetooth trackers for solving positioning problems for indoors environments.

Keywords: information system, indoor positioning, beacons, Bluetooth, location, least squares method.

For citation: Grinyak V.M 3D indoor positioning system based on Bluetooth beacons. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/Grinyak_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.023 (In Russ).

Введение

Задачи позиционирования внутри помещений в настоящее время выделились как самостоятельный класс навигационных задач. Они характеризуются особыми математическими моделями и алгоритмами, архитектурой программных решений, учитывающей особенности датчиков и программно-аппаратных платформ [1]. Главной особенностью систем позиционирования внутри помещений является использование дополнительных источников навигационной информации, так как традиционные данные – спутниковых навигационных систем второго поколения (GPS, Глонасс) – могут быть не доступными: в помещениях нередко бывает ограничено число видимых спутников, приём их данных бывает неустойчивым. Даже при хорошей доступности сигнала существует фундаментальная проблема спутниковых навигационных систем – низкая точность определения высоты объекта над поверхностью Земли («проблема этажа») [2]. В качестве источников навигационных данных для определения местоположения внутри помещений хорошо зарекомендовали себя устройства передачи данных Bluetooth, точки доступа в интернет Wi-Fi, датчики атмосферного давления, магнитометр, инерциальные навигационные средства (акселерометры, гироскопы) и т.п. [3-5]. Их информация может быть использована как по отдельности, так и совместно; это зависит от области приложения системы позиционирования и особенностей конкретной решаемой задачи.

В настоящее время решения общего назначения на основе данных Wi-Fi и Bluetooth являются наиболее распространёнными [6-8]. Причина этого в том, что при применении Wi-Fi возможно использование уже развёрнутых сетей передачи данных. Использование для задач навигации внутри помещений Bluetooth устройств также имеет целый ряд преимуществ: это создание системы на базе недорогого и широко распространённого оборудования, не требующего специальных профессиональных навыков персонала; возможность произвольного расположения Bluetooth маяков в помещении в силу их небольшого размера и отсутствия необходимости подводить электропитание (автономности). Как показывает анализ известных решений и исследований, точность позиционирования на основе данных Bluetooth в целом выше, чем у Wi-Fi. Ещё одна полезная особенность – дальность видимости Bluetooth устройств невелика, их сигнал плохо проходит сквозь капитальные стены что практически полностью решает упомянутую «проблему этажа».

Использование инерциальных датчиков позволяет обеспечить автономность навигационной системы и не требует построения внешней инфраструктуры. Вместе с тем, для хорошего и устойчивого позиционирования требуются инерциальные устройства высокой точности, что возможно лишь для систем специального назначения [9-11] и не доступно широкому бытовому потребителю. Известны также попытки разработки систем оптического типа, когда анализируются данные предварительного сканирования помещения и изображения с камеры позиционируемого устройства (в т.ч. кругового обзора) [12, 13]. Такие системы требуют больших вычислительных ресурсов и могут использоваться только в «контрастных» помещениях с хорошей освещённостью, чувствительны к появлению посторонних объектов, точность их в общем случае ниже, чем у систем на основе Wi-Fi/Bluetooth.

Наиболее популярный способ использования данных Wi-Fi и Bluetooth – использование метода радиоотпечатков, то есть определение местоположения объекта путём сравнения уровней сигнала от доступных датчиков с заранее измеренными значениями, которые «привязаны» к карте помещения [14-16]. Альтернативный распространённый способ – решение задачи типа мультилатерации [17, 18]. В этом случае на основе уровня принимаемого сигнала оцениваются дальности «объект-датчик» и затем определяется местоположение объектов относительно датчиков. Этот способ аналогичен используемому, например, в гидроакустике [19, 20]. Оба способа методологически схожи, так как используют одинаковую информационную базу – измерения уровней сигнала в течение некоторого времени. При первом способе необходимо предварительно создать базу данных радиоотпечатка. Второй способ требует предварительной калибровки датчиков и решения задачи глобальной и местной координатной привязки (выставки) системы [21].

Традиционно системами позиционирования внутри помещений решаются 2D навигационные задачи, известные реализации дают представления о характерной погрешности их решения [22-24]. Однако некоторые приложения требуют построения 3D систем. К ним относятся задачи позиционирования небольших воздушных объектов (типа квадрокоптеров) используемых, например, для видеонаблюдения или доставки небольших грузов [12, 25]. Главной проблемой построения системы позиционирования для воздушных объектов является достижение требуемой точности определения их местоположения во всех трёх осях. Другими словами, необходимо априорно оценивать возможную точность позиционирования при известной конфигурации датчиков, и спланировать (спроектировать) число и расположение датчиков должным образом, если точность позиционирования недостаточна.

В настоящей работе рассматривается модель многопозиционной маячной навигационной системы, построенной на основе датчиков Bluetooth и используемой для 3D позиционирования воздушных объектов. Целью статьи является разработка способа априорной оценки погрешности решения навигационной задачи и его демонстрация в характерных ситуациях. В качестве основы такого способа выбраны классические представления метода наименьших квадратов.

Материалы и методы

Данные, передаваемые Bluetooth маяками, содержат достаточно ёмкую информацию об их работе, прежде всего, радиотехнического характера. Главными элементами данных для решения рассматриваемой задачи позиционирования являются уникальный идентификатор или имя Bluetooth устройства и относительный уровень мощности принимаемого от него на объекте сигнала. Уровень мощности сигнала и дальность «объект-маяк» связаны следующим известным соотношением [26]:

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

Здесь u – уровень сигнала, принимаемого объектом, находящимся на расстоянии d от маяка, u_* – калибровочный уровень сигнала, то есть измеренный на калибровочном расстоянии d_* от устройства, n – коэффициент затухания радиосигнала в окружающей среде; параметр n считается известным. Параметры d_* и u_* являются настраиваемыми техническими характеристиками конкретного маяка, они могут быть заданы при его конфигурировании. Значения n , d_* и u_* также могут быть определены по результатам калибровки маяков – предварительной или на начальном этапе эксплуатации системы. Единицей измерения величины u , используемой в распространённых программных платформах, служит дБм.

Введём правую ортогональную систему координат x, y, z . Пусть её привязка к помещению считается известной. Пусть имеется N маяков, доступных для наблюдения позиционируемым объектом. Зададим дальность «объект-маяк» формулой:

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

где x, y, z – координаты объекта, x_i, y_i, z_i – координаты i -го маяка, $i = \overline{1, N}$.

Положим, что измерение уровней сигнала производится в течение некоторого заданного отрезка времени. Запишем уравнения измерений в виде:

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

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

В том случае, если позиционируемый объект движется, система уравнений (1) дополняется моделью движения объекта, например, в случае равномерного прямолинейного движения это будут уравнения:

$$\begin{aligned} x(t_k) &= x(t_*) + (t_k - t_*) v_x, \\ y(t_k) &= y(t_*) + (t_k - t_*) v_y, \\ z(t_k) &= z(t_*) + (t_k - t_*) v_z, \end{aligned} \quad (2)$$

где t_* – некоторый момент времени, может как принадлежать интервалу наблюдения, так и находиться вне его, v_x, v_y, v_z – компоненты вектора скорости объекта.

Будем считать неизвестными искомыми величинами координаты объекта. Известным общим подходом к решению задач типа (1) или (1), (2) является их линеаризация около некоторого опорного решения, которое характеризует априорные представления о местоположении и скоростях объекта. Линеаризация уравнения (1) приводит его к виду:

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

где $\delta x(t_k), \delta y(t_k), \delta z(t_k)$ – погрешности априорных представлений о координатах объекта, $\delta u_i(t_k)$ – невязка измерения. Если объект движется, то система линейных алгебраических уравнений (3) дополняется линеаризованной моделью движения объекта. Запишем систему (3) в общем виде:

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

Здесь $\delta \mathbf{Z}$ – полный вектор (длины $M \times N$) невязок измерений на интервале наблюдения, $\delta \mathbf{s}(t_*)$ – вектор погрешностей априорных представлений о координатах или координатах и скоростях объекта в выбранный момент времени t_* . \mathbf{H} – матрица коэффициентов, определяемая уравнением (3), $\boldsymbol{\xi}$ – вектор приведенных погрешностей измерений.

Введём матрицу $\mathbf{Q} = \text{mean}[\boldsymbol{\xi} \boldsymbol{\xi}^T]$ – ковариационную матрицу случайного вектора $\boldsymbol{\xi}$. Она определяется на основе характеристик случайных инструментальных погрешностей измерений $\eta_i(t_k)$ и предполагается известной. Матрица $\mathbf{D} = (\mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H})^{-1}$ определяет дисперсию погрешности оценки вектора состояния $\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*)$ методом наименьших квадратов, так что $\mathbf{D} = \text{mean}[(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))^T]$, где mean – символ математического ожидания.

Существует три аспекта разрешимости рассматриваемой задачи – как исходного (1), так и линеаризованного варианта (3). Первый – принципиальная разрешимость, то есть существование и единственность решения. Его можно интерпретировать не вырожденностью (полнотой ранга) матрицы \mathbf{H} . Второй аспект разрешимости – устойчивость решения по Ж. Адамару. Она определяется обусловленностью задачи (4), то есть числом обусловленности матрицы \mathbf{H} . Третий аспект разрешимости – характерная погрешность решения в условиях погрешности измерений. Она может быть априорно оценена значением соответствующих коэффициентов матрицы \mathbf{D} .

Принципиальная разрешимость. В общем случае система функций, образующих коэффициенты матрицы системы алгебраических линейных уравнений (3), линейно независима. Поэтому можно говорить о полноте ранга матрицы \mathbf{H} и принципиальной разрешимости рассматриваемой задачи позиционирования. Вместе с тем, следует иметь в виду и существование запрещённых (ненаблюдаемых) опорных решений, которые делают систему уравнений (3) вырожденной. К таким решениям относятся случаи, когда все маяки и позиционируемый объект находятся в одной плоскости [27, 28].

Устойчивость решения. Для оценки устойчивости решения в условиях погрешностей вычислений на ЭВМ можно использовать следующее известное достаточное условие [29]:

$$\mu < \mu_*, \quad (5)$$

где μ – число обусловленности матрицы \mathbf{H} по отношению к её спектральной норме, а μ_* – некоторое заданное критическое значение этого числа обусловленности. Известно несколько подходов к заданию критического числа обусловленности. Например, существует такая оценка [30]:

$$\mu_* = \frac{1}{[\sqrt{u}(2u - 3)(4u + 27) + 11]\varepsilon_1}.$$

Здесь u – размерность вектора $\delta\mathbf{s}(t_*)$, ε_1 – относительная точность представления чисел с плавающей точкой при вычислениях на ЭВМ (например, при удвоенной (double) точности $\varepsilon_1 \approx 10^{-16}$). Если принять $u = 6$, то $\mu_* \approx 10^{-13}$. Результаты моделирования показывают, что в типичных ситуациях условие (5) для рассматриваемой задачи как правило соблюдается.

Погрешность. В работах, опубликованных ранее [22-24] было показано, что в рассматриваемой задаче матрица \mathbf{D} хорошо описывает вероятностные свойства как её линейризованного варианта (3), так и основного, исходно нелинейного (1). Характерная погрешность оценки местоположения объекта может быть определена соответствующими коэффициентами матрицы \mathbf{D} при различных конфигурациях системы маяков и различном числе используемых измерений, что позволяет решить исходную поставленную задачу априорной оценки погрешности позиционирования.

Результаты

При проведении натурных исследований использовались Bluetooth маяки SKYLAB Beacon VG01 [31]. Мобильный телефон HUAWEI WAS-LX1 на платформе Android использовался в качестве позиционируемого объекта. Инструментальная погрешность измерений уровня сигнала маяков $\eta_i(t_k)$ была оценена при их калибровке как нормально распределенная случайная величина с дисперсией $25(\text{дБм})^2$; от каждого маяка было взято по 50 измерений, что соответствует длине интервала наблюдения приблизительно 3-5 секунд. Оценка координат объекта осуществлялась методом мультилатерации (3).

Эксперименты проводились в помещении типа «холл» размером 10x10 метров и высотой 4 метра. Маяки располагались в следующих вариантах (таблица 1). Позиционируемый объект покоился.

Таблица 1 – Варианты расположения маяков в помещении
Table 1 – Variants of beacons position

Номер варианта	Количество маяков	Расположение маяков
1	4	На полу по углам помещения
2	8	4 маяка на полу и 4 маяка на потолке по углам помещения
3	17	8 маяков на полу – по углам помещения и у стен между ними, 8 маяков на потолке – по углам помещения и у стен между ними; 1 маяк в центре потолка.

На рисунке 1 показаны результаты позиционирования объекта в случае 4 маяков (расположены на полу по углам помещения). Реальное расположение объекта показано красным кружком. Оценка его местоположения – синими точками. В каждом случае производилась серия из 30 последовательных формирований вектора измерений и оценок координат объекта.

Прямоугольниками на «стенах» и на «полу» показаны интервалы, соответствующие погрешностям оценивания координат объекта – среднеквадратичным отклонениям, определённым по значениям диагональных элементов матрицы **D**. Из рисунков видно, что реальная погрешность позиционирования вполне соответствует её априорной оценке.

Так, при расположении объекта в центре помещения на высоте 3м (рисунок 1а) погрешность позиционирования составила около 0.5м по «плоским» координатам и около 1м по вертикали. При приближении объекта к маякам (рисунки 1б и 1в) точность определения высоты улучшается. Если объект находится на высоте 1м (рисунки 1г, 1д и 1е) точность оценки высоты ухудшается примерно в 2 раза за счёт изменения условий наблюдения. Пример рисунка 1 показывает, что в рассмотренном помещении четырёх маяков недостаточно для качественного решения задачи (см. также рисунок 4).

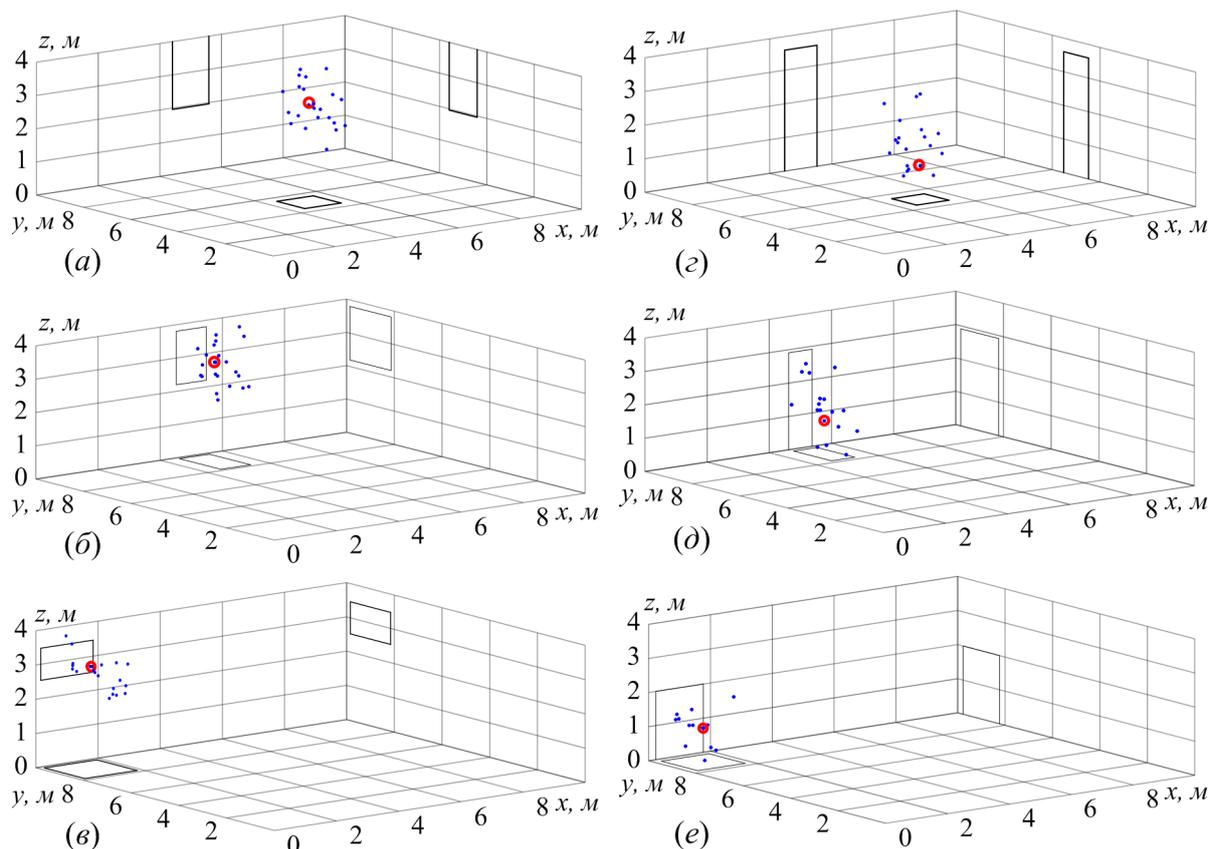


Рисунок 1 – Результаты позиционирования объекта для варианта 4 маяков
 Figure 1 – Object positioning results with 4 beacons

На рисунке 2 показаны результаты позиционирования объекта в случае 8 маяков (расположены на потолке и на полу по углам помещения). Видно, что точность позиционирования существенно улучшилась во всех случаях, особенно при приближении объекта к маякам. Так, например, в точке $x=1, y=9, z=2$ (рисунок 2е)

погрешность оценки местоположения составила около 0.5м по плоским координатам, и меньше 0.3м по высоте. Уменьшение погрешности позиционирования идёт как за счёт роста числа маяков (и, соответственно, числа измерений), так и за счёт улучшения условий наблюдения – маяки как бы «окружают» позиционируемый объект [32-34]. Вместе с тем, если объект находится в середине помещения (рисунок 2а) точность оценки высоты остаётся невысокой (около 1м) из-за удалённости от маяков (см. также рисунок 5).

На рисунке 3 показаны результаты позиционирования объекта в случае 17 маяков (добавлены маяки между углами на полу и потолке и дополнительно один маяк в центре потолка). Увеличение числа маяков, а, главное, увеличение числа «близких» к объекту маяков существенно уменьшает погрешность оценивания по всем трём координатам. Так, при нахождении объекта в середине комнаты (рисунок 3а) среднеквадратичное отклонение оценки координат объекта составляет менее 0.2м, что даёт возможность безопасно позиционировать небольшой летающий дрон (см. также рисунок 6).

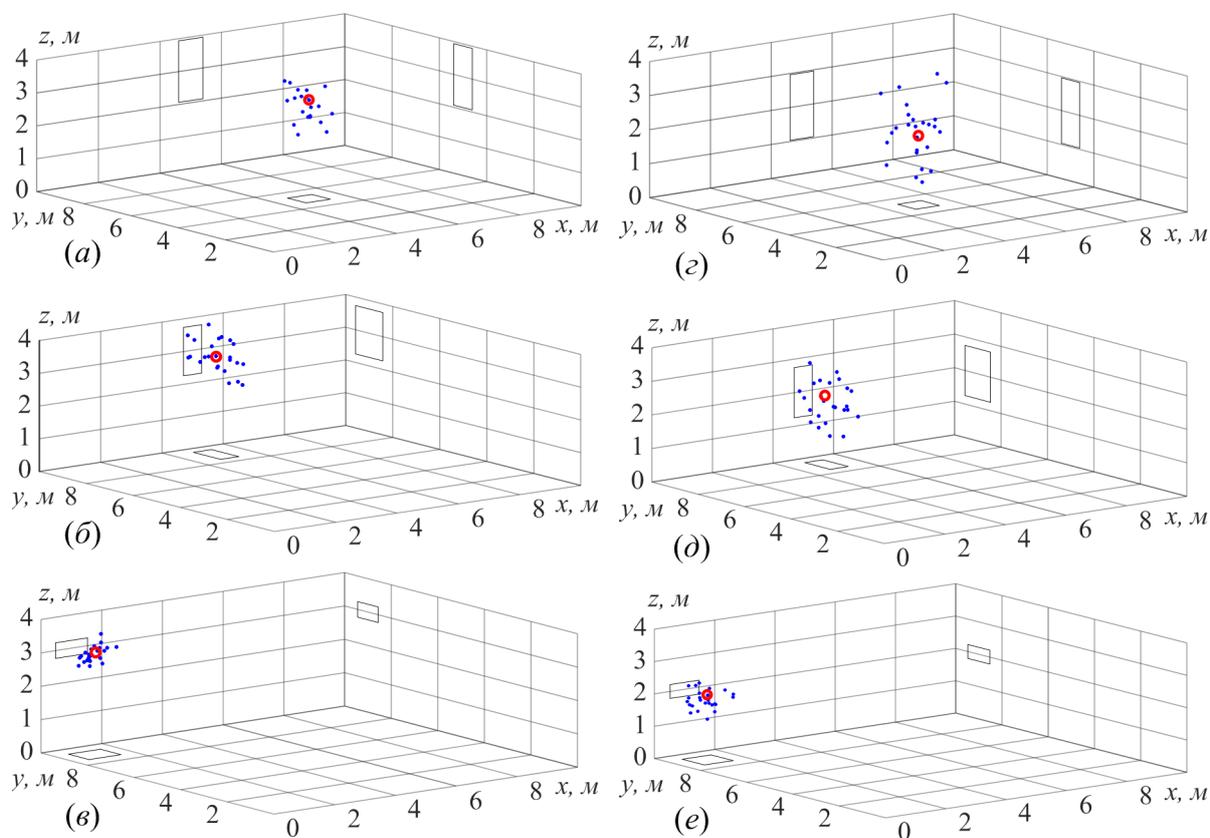


Рисунок 2 – Результаты позиционирования объекта для варианта 8 маяков
 Figure 2 – Object positioning results with 8 beacons

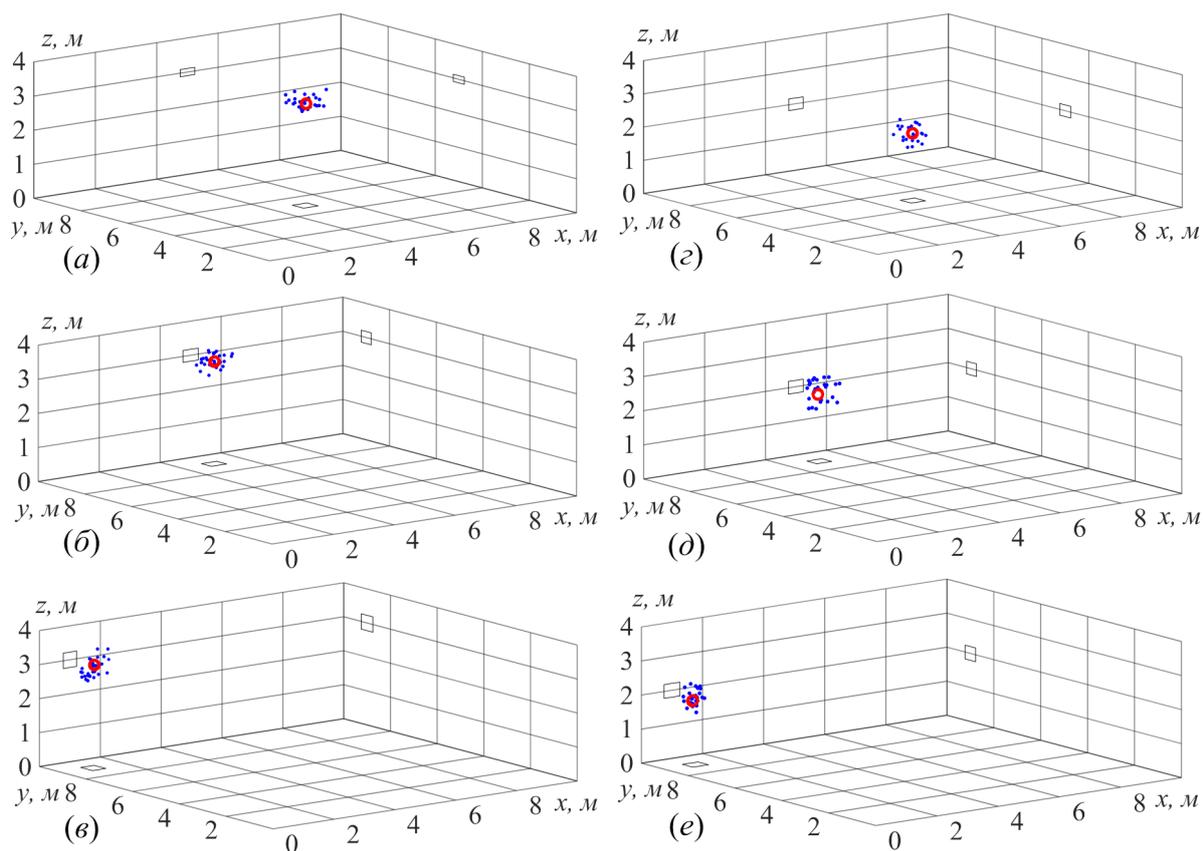


Рисунок 3 – Результаты позиционирования объекта для варианта 17 маяков
 Figure 3 – Object positioning results with 8 beacons

На рисунках 4-6 показаны среднеквадратичные отклонения погрешности оценивания координат позиционируемого объекта, которые были определены по значениям диагональных элементов матрицы **D**. Красные линии – среднеквадратичные отклонения высоты объекта (координата z), синие и зелёные – среднеквадратичные отклонения «плоских» координат объекта x и y . Рисунок 4 соответствует случаю четырёх маяков (таблица 1), рисунок 5 – восьми маякам, рисунок 6 – семнадцати. Объект находится в точках с различными координатами, координата y равна оси абсцисс графиков, а координаты x и z принимают следующие значения: $x=5, z=3$ (рисунок 4а), $x=1, z=3$ (рисунок 4б), $x=5, z=1$ (рисунок 4в), $x=1, z=1$ (рисунок 4г); $x=5, z=3$ (рисунки 5а, 6а), $x=1, z=3$ (рисунки 5б, 6б), $x=5, z=2$ (рисунки 5в, 6в), $x=1, z=2$ (рисунки 5г, 6г). Данные рисунков 4-6 соотносятся с данными рисунков 1-3.

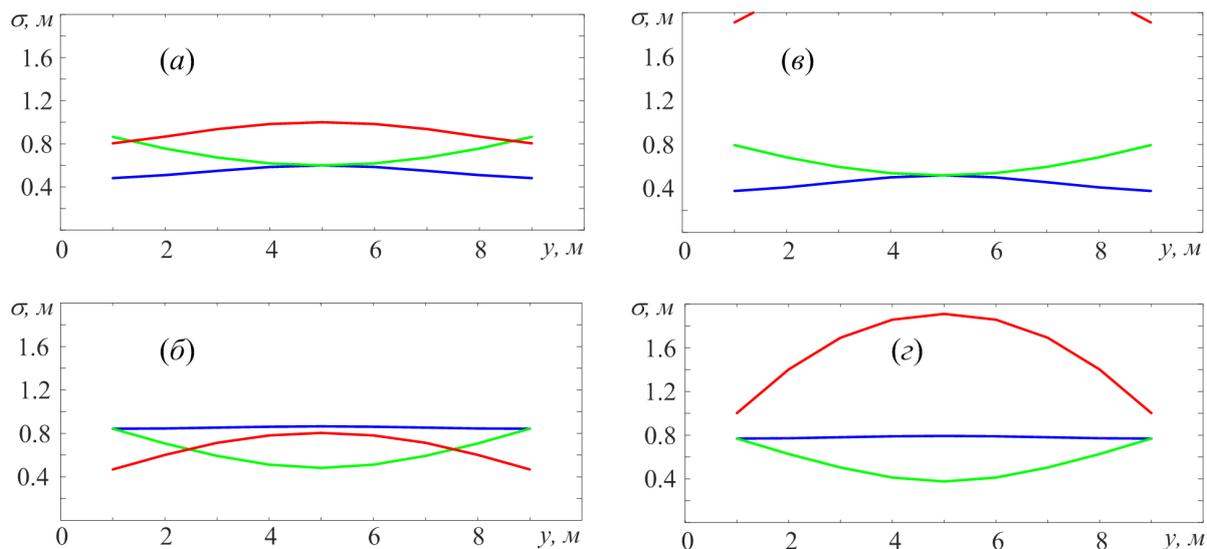


Рисунок 4 – Значения среднеквадратичных отклонений погрешности оценивания координат объекта: случай 4 маяков
Figure 4 – Values of the root-mean-square deviations of the error in estimating the coordinates of the object. Case of 4 beacons

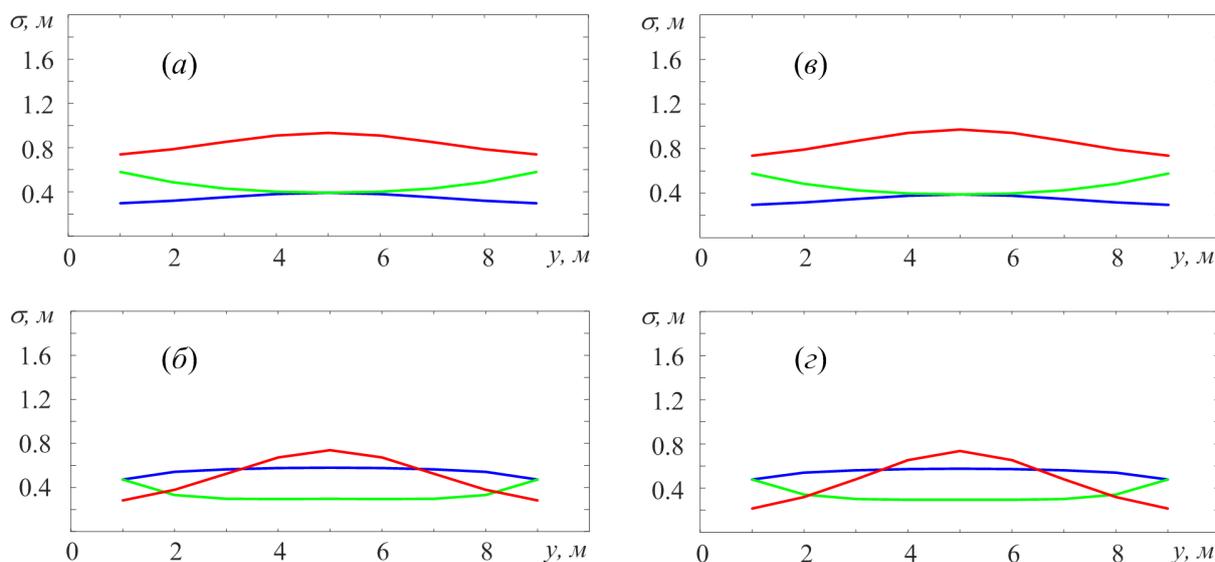


Рисунок 5 – Значения среднеквадратичных отклонений погрешности оценивания координат объекта: случай 8 маяков
Figure 5 – Values of the root-mean-square deviations of the error in estimating the coordinates of the object. Case of 8 beacons

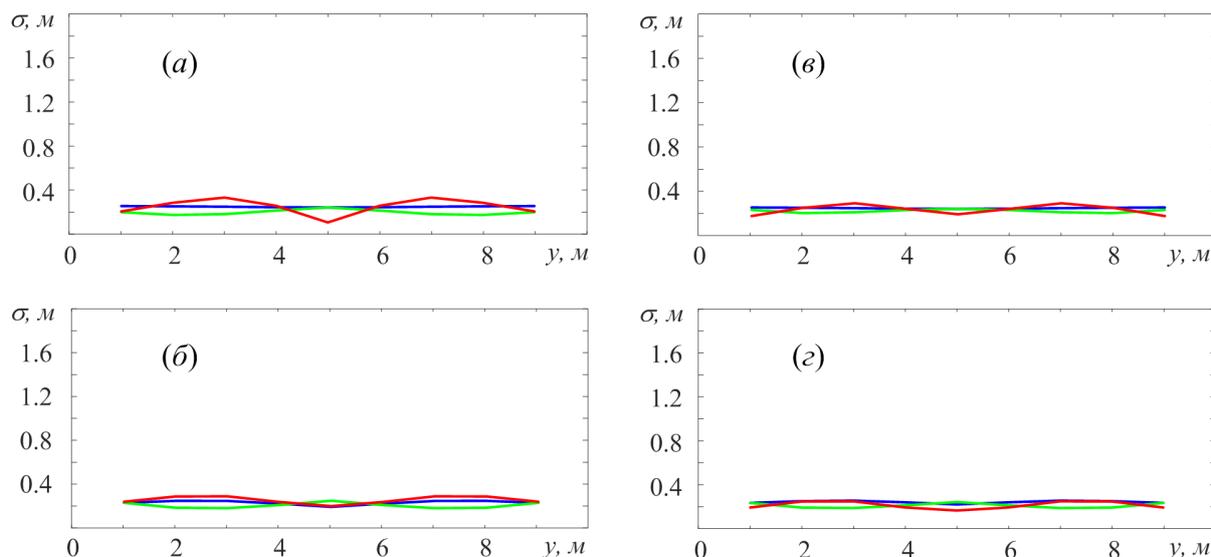


Рисунок 6 – Значения среднеквадратичных отклонений погрешности оценивания координат объекта: случай 17 маяков
 Figure 6 – Values of the root-mean-square deviations of the error in estimating the coordinates of the object. Case of 17 beacons

На рисунках 4-6 хорошо видны характерные значения погрешностей оценивания координат и характер их зависимости от количества и расположения маяков относительно объекта. Так, в случае четырёх маяков погрешность оценивания высоты резко возрастает по мере удаления объекта от маяков (рисунок 4), особенно при нахождении объекта на малой высоте (рисунки 4в и 4г). Тот же эффект наблюдается и в случае восьми маяков (рисунок 5), однако он в меньшей степени проявляется для объекта, находящегося на малой высоте из-за более благоприятных условий наблюдения (рисунки 5в и 5г). При большой плотности расположения маяков погрешности оценивания всех трёх координат стабильны (случай 17 маяков, рисунок 6), лишь по мере приближения к маяку, расположенному в середине потолка, значительно улучшается оценка высоты (рисунок 6а, красный график).

Обсуждение

Хотя проблеме позиционирования внутри помещений посвящено большое число публикаций, они как правило рассматривают перспективы и результаты решения двумерной задачи. Настоящая работа посвящена решению этой задачи в трёхмерном навигационном пространстве.

Приведённые на рисунках 1-6 данные показывают, что применение устройств типа Bluetooth даёт возможность качественного решения 3D задачи позиционирования на характерных дальностях «объект-маяк» 3-6 метров при достаточном количестве измерений и хороших условиях наблюдения: если датчики располагаются как бы «окружая» объект.

Проектирование системы позиционирования включает в себя следующие этапы: задание координат Bluetooth маяков и координат объекта;

- формирование системы уравнений (3), дополненной при необходимости линейаризованными уравнениями (2);
- вычисление диагональных элементов матрицы **D**;

- если ожидаемая точность позиционирования в выбранной точке недостаточна – «добавление» маяков «вблизи» к этой точке и новая оценка точности.

Предложенный способ априорной оценки погрешности позиционирования, основанный на представлениях метода наименьших квадратов, показывает хорошие результаты и вполне соответствует реальной погрешности оценивания. Представляется, что он может быть применен в случае использования любых методов позиционирования, основанных на прямых или косвенных измерениях дальностей. Ещё одно направление использования предложенного способа – оценка необходимой и достаточной плотности «расстановки» опорных точек при составлении радиоотпечатка помещения (если для позиционирования используется именно этот способ). Дискретность радиоотпечатка должна соответствовать характерной погрешности решения задачи позиционирования во избежание недостатка или избыточности данных.

Рисунки 1-6 были рассчитаны для случая покоящегося объекта. Точность решения задачи в случае её дополнения моделью движения объекта (3) будет в 2-4 раза ниже – в зависимости от скорости и направления движения [22-24]. Следует учитывать, что для движущегося объекта интервал наблюдения не может быть большим (обычно он не превышает 1-2 секунд). С учётом ограничений на период обновления буфера данных (0.05-0.5 секунд) это существенно уменьшает количество доступных измерений для решения задачи. В этом случае для качественного позиционирования движущихся объектов необходимо увеличение числа маяков (особенно расположенных близко к объекту), что вполне достижимо с учётом их автономности и низкой стоимости. Так, в рассмотренном на рис. 3 и 6 примере целесообразно добавить маяки (10-20шт), расположив их на стенах и потолке помещения.

Как следует из результатов исследований других авторов, определённые перспективы улучшения качества решения рассматриваемой задачи могут быть связаны с комплексированием навигационных данных от источников различной природы [4, 9, 11]. Вместе с тем, использование большого числа разнородных данных способно сильно усложнить построение и эксплуатацию системы позиционирования.

Заключение

В работе описан способ оценки характерной погрешности определения координат для системы 3D позиционирования внутри помещений, построенной на основе Bluetooth маяков. Способ использует классические модельные представления задачи метода наименьших квадратов. Реализация метода требует линеаризации задачи, что порождает проблему локальности свойств решения. Проведённые натурные эксперименты показывают, что в рассматриваемой задаче позиционирования линеаризованная модель достаточно хорошо описывает исходную нелинейную задачу. Поэтому предложенный способ в принципе позволяет спроектировать систему позиционирования, работающую с любой наперёд заданной требуемой точностью.

Результаты исследования позволяют оптимистично взглянуть на перспективы решения 3D задач позиционирования внутри помещений с помощью Bluetooth маяков. При достаточном количестве маяков и их удачной конфигурации реально достижимая точность позиционирования составляет порядка 0.2-0.3 метра по всем трём координатам. Такая точность позволяет осуществлять навигацию небольших воздушных объектов типа квадрокоптеров. Предложенный подход к оценке погрешности актуален для любого способа позиционирования, основанного на прямых или косвенных измерениях дальностей «объект-маяк», в том числе и для метода радиоотпечатка, используемого в помещениях с большим числом стен.

Возможным направлением использования данных позиционирования по трём координатам по данным Bluetooth, кроме управления дронами, может быть анализ потоков людей в помещениях сложной конфигурации с целью решения задач обеспечения безопасности и защиты в чрезвычайных ситуациях.

Благодарности

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект 18-07-00132.

ЛИТЕРАТУРА

1. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ipin-conference.org/> (дата обращения: 01.06.2020).
2. Шебшаевич В.С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993.
3. Щёкотов М.С., Кашевник А.М. Сравнительный анализ систем позиционирования смартфонов в помещениях. *Труды СПИИРАН*. 2012;(4):459-471.
4. Желамский М.В. Особенности создания поля позиционирования для локальной навигации в закрытых пространствах. *Измерительная техника*. 2014;(7):40-44.
5. Намиот Д.Е., Макарычев И.П. Об альтернативной модели отметки местоположения в социальных сетях. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020;8(2):74-90.
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):2-10.
7. Мурашко И.А., Храбров Д.Е. Методика локального позиционирования на основании Wi-Fi-сети университета. *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2: Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, Вылічальная тэхніка і кіраванне*. 2015;(2):119-127.
8. Болотова С.Ю., Зонов А.В., Тютин А.П. Навигация внутри помещений в мобильных приложениях. *Программная инженерия*. 2018;9(1):29-34.
9. 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):29-42.
10. Кроненветт Н., Руппельт Я., Троммер Г.Ф. Прецизионное позиционирование пешехода в помещении на основе контроля за стадиями его походки. *Гироскопия и навигация*. 2017;(1):33-48.
11. Емельянцева Г.И., Степанов А.П., Блажнов Б.А. О решении навигационной задачи для летательных аппаратов с использованием инерциального модуля на микромеханических датчиках и наземных радиоориентиров. *Гироскопия и навигация*. 2017;(1):3-17.
12. Anbarasu B., Anitha G. Indoor Scene recognition for Micro Aerial Vehicles Navigation using Enhanced SIFT-ScSPM Descriptors. *The Journal of Navigation*. 2020;73(1): 37-55.
13. Tsai H.-Y., Hishiyama R., Kuwahara Y., Leiri Y. Vision-Based Indoor Positioning (VBIP) - an Indoor AR Navigation System with a Virtual Tour Guide. *Lecture Notes in Computer Science*. 2019;11677 LNCS: 96-109.

14. Gmar D.V., Dyuldina K.I., Snopko S.I., Shakhgeldyan K.J., Kryukov V.V. Indoor navigation service based on Wi-Fi positioning. *RPC 2017 - Proceedings of the 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications*. 2017:68-71.
15. Stepanov O.A. Map-aided navigation, indoor navigation, and fingerprint-based positioning. Common features and differences. *23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016 - Proceedings 23*. 2016:568-571.
16. Воронов Р.В., Малодушев С.В. Динамическое создание карт уровня WiFi-сигналов для систем локального позиционирования. *Системы и средства информатики*. 2014;24(1):80-92.
17. Салех Х.М., Александров Д.В. Радиолокация с использованием Wi-Fi-точек доступа беспроводных сетей внутри помещений. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2012;10(7):29-36.
18. Булычев В.Ю., Булычев Ю.Г., Ивакина С.С., Насенков И.Г., Николас П.И., Чепель Е.Н. Обоснование методов оптимального оценивания параметров движения цели в триангуляционной измерительной системе. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2015;(4):94.
19. Васильев К.К., Бобков А.В. Динамическое использование ориентиров для оценки координат автономных необитаемых подводных аппаратов. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2017;(12):11-14.
20. Мартынюк М.В., Генералов А.В., Наумов С.С., Залетнов С.Е., Дмитриев Д.В., Тимофеева О.П. Разработка системы локального акустического позиционирования на базе персонального компьютера. *Измерительная техника*. 2015;(10):68-71.
21. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S. Dynamic adjustment of multiposition observing system with respect to trajectory measurements. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 1999;38(1):124-130.
22. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Шурыгин А.В. Оценка возможностей использования Bluetooth-устройств для навигации внутри помещений *Информационные технологии*. 2018;24(9):610-617.
23. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Люлько В.И., Цыбанов П.А. Возможности позиционирования внутри помещений с помощью Bluetooth устройств. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2018;6(2):132-143.
24. Гриняк В.М., Гриняк Т.М., Цыбанов П.А. Позиционирование внутри помещений с помощью Bluetooth-устройств. *Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса*. 2018;10(2):137-147.
25. Попп М., Профет С., Шольц Г., Троммер Г.Ф. Новая система навигации и наведения микролетательных аппаратов, способных беспрепятственно проникать в здания *Гироскопия и навигация*. 2015;(2):3-17.
26. Motley A.J., Keenan J.M.P. Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz. *Electronics Letters*. 1988;24(12):763-764.
27. Гриняк В.М. Исследование пространственной задачи навигации в условиях неполной измерительной информации. *Дальневосточный математический журнал*. 2000;1(1):93-101.
28. Гриняк В.М., Гриняк Т.М., Иваненко Ю.С. Динамическая выставка многопозиционной системы наблюдения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2017;(3):12.
29. Малышев А.Н. Введение в вычислительную линейную алгебру. - Новосибирск: Наука, 1991.

30. Крыжко И.Б., Глушакова Т.Н. Численное исследование разрешимости обратных траекторных задач. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2007;(1):148-151.
31. SKYLAB Low Power Consumption Waterproof Bluetooth beacon -VG02. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.skylabmodule.com/skylab-low-power-consumption-waterproof-bluetooth-eddystone-nordic-chipset-beacon-itag-bluetooth-beacon-vg02/> (дата обращения: 01.06.2020)
32. Dulimarta H.S., Jain A.K. Mobile robot localization in indoor environment. *Pattern Recognition*. 1997;30(1):99-111.
33. Ranganathan P., Hayet J.B., Devy M., Hutchinson S., Lerasle F. Topological navigation and qualitative localization for indoor environment using multi-sensory perception. *Robotics and Autonomous Systems*. 2002;41(2-3):137-144.
34. Барабанова Л.П. О геометрическом факторе разностно-дальномерного позиционирования с минимальным числом маяков. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2005;(3):89-96.

REFERENCES

1. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, available at: <http://ipin-conference.org/> (date of access 01.06.2020).
2. Shebshaeovich V.S. Setevye sputnikovye radionavigacionnye sistemy (Network satellite radio navigation systems), Moscow, Radio i svjaz', 1993.
3. Shchekotov M., Kashevnik A. Comparative Analysis of Indoor Positioning Systems for Smartphones. *Proc. FRUCT Conf*. 2012;(4):459-471.
4. Zhelamskii M.V. Features of the Construction of a Positioning Field for Local Navigation in Enclosed Spaces. *Measurement Techniques*. 2014;57(7):791-799.
5. Namiot D., Makarychev I. On the alternative model of location marking on social networks. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020;8(2):74-90.
6. Assur O.S., Filaretov G.F. Razrabotka kompleksnogo metoda pozicionirovaniya ob'ektov po dannym besprovodnyh setej Wi-Fi i ustrojstv BLE (Bluetooth Low Energy). *Izvestija Instituta Inzhenernoj Fiziki*. 2015;(2):2-10.
7. Murashko I.A., Khrabrov D.E. Metodika lokal'nogo pozicionirovaniya na osnovanii Wi-Fi-seti universiteta (Methods of local positioning based on Wi-Fi-network of university). *Vesnik Grodzenskaga dzjarzhajnaga yuniversitjeta imja Janki Kupaly. Seryja 2: Matjematyka. Fizika. Infarmatyka, Vylichal'naja tjehnika i kiravanne*. 2015;(2):119-127.
8. Bolotova S. Yu., Zonov A.V., Tutin A.P. Indoor Navigation in Mobile Applications. *Programmnyaya injeneriya*. 2018;9(1):29-34.
9. Davidson P., Kirkko-Jaakkola M., Collin J., Takala J. Navigacionnyj algoritm s ispol'zovaniem planov zdaniy i dannyh avtonomnyh datchikov (Navigation Algorithm Combining Building Plans with Autonomous Sensor Data). *Gyroscopy and Navigation*. 2015;(3):188-196.
10. Kronenwett N., Ruppelt J., Trommer G.F. Motion Monitoring based on a Finite State Machine for Precise Indoor Localization. *Gyroscopy and Navigation*. 2017;(3):190-199.
11. Emel'yantsev G.I., Stepanov A.P., Blazhnov B.A. O reshenii navigacionnoj zadachi dlja letatel'nyh apparatov s ispol'zovaniem inercial'nogo modulja na mikromehaničeskikh datchikah i nazemnyh radioorientirov (Solution of Aircraft Navigation Problem using MEMS IMU and Ground Radio Sources). *Gyroscopy and Navigation (Giroskopija i navigacija)*. 2017;(1):3-17.

12. Anbarasu B., Anitha G. Indoor Scene recognition for Micro Aerial Vehicles Navigation using Enhanced SIFT-ScSPM Descriptors. *The Journal of Navigation*. 2020;73(1):37-55.
13. Tsai H.-Y., Hishiyama R., Kuwahara Y., Leiri Y. Vision-Based Indoor Positioning (VBIP) - an Indoor AR Navigation System with a Virtual Tour Guide. *Lecture Notes in Computer Science*. 2019;(11677 LNCS):96-109.
14. Gmar D.V., Dyuldina K.I., Snopko S.I., Shakhgeldyan K.J., Kryukov V.V. Indoor navigation service based on Wi-Fi positioning. *RPC 2017 - Proceedings of the 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications*. 2017:68-71.
15. Stepanov O.A. Map-aided navigation, indoor navigation, and fingerprint-based positioning. Common features and differences. *23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016 - Proceedings 23*. 2016:568-571.
16. Voronov R.V., Malodushev S.V. Dinamicheskoe sozdanie kart urovnja Wifi-signalov dlja sistem lokal'nogo pozicionirovanija (Dynamic Creation Of Wi-Fi-Signal Level Maps For Location Systems). *Systems and Means of Informatics*. 2014;(1):80-92.
17. Saleh H.M., Aleksandrov D.V. Indoor positioning using WI-FI-access points. *Informatsionno-Izmeritelnye i Upravlyaushie Systemy*. 2012;10(7):29-36.
18. Bulychev V.Y., Bulychev Y.G., Ivakina S.S., Nasenkov I.G., Nikolas P.I., Chepel E.N. Substantiation of methods for optimal estimation of target motion parameters in triangulation location systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2015;54(4):593-608.
19. Vasiliev K.K., Bobkov A.V. Dinamicheskoe ispol'zovanie orientirov dlja ocenki koordinat avtonomnyh neobitaemyh podvodnyh apparatov (Dynamic use landmarks for coordinates estimation). *Informatsionno-Izmeritelnye i Upravlyaushie Systemy*. 2017;(12):11-14.
20. Martynyuk M.V., Generalov A.V., Naumov S.S., Zaletnov S.E., Dmitriev D.V., Timofeeva O.P. Development of A System Of Local Acoustic Positioning Based On A Personal Computer. *Measurement Techniques*. 2016;(10):1179-1184.
21. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S. Dynamic adjustment of multiposition observing system with respect to trajectory measurements. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 1999;38(1):124-130.
22. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., Shurygin A.V. Feasibility Study of Indoor Navigation with Bluetooth Beacons. *Informatsionniye Tehnologii*. 2018;24(9):610-617.
23. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., Lulko V.I., Tsibanov P.A. Indoor positioning system based on Bluetooth beacons. *Modelirovanie, Optimizacija i Informacionnye Tehnologii*. 2018;6(2):132-143.
24. Grinyak V.M., Grinyak T.M., Tsibanov P.A. Indoor positioning system based on Bluetooth beacons. *The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics*. 2018;10(2):137-147.
25. Popp M., Prophet S., Scholz G., Trommer G.F. A novel guidance and navigation system for MAVs capable of autonomous collision-free entering of buildings. *Gyroscopy and navigation*. 2015;(3):3-17.
26. Motley A.J., Keenan J.M.P. Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz. *Electronics Letters*. 1988;24(12):763-764.
27. Grinyak V.M. Spatial navigation problem under incomplete measuring information conditions. *Dalnevostochnyi matematicheskiy jurnal*. 2000;1(1):93-101.
28. Grinyak V.M., Grinyak T.M., Ivanenko Y.S. Dinamicheskaja vystavka mnogopozicionnoj sistemy nabljudenija (Dynamic Adjustment of Multiposition Observing System). *Modelirovanie, Optimizacija i Informacionnye Tehnologii*. 2017;(3): 2.
29. Malyshev A.N. Vvedeniye v vychislitelnyu lineynuyu algebru (Introduction to computing linear algebra), Novosibirsk, Nauka, 1991.

30. Kryzhko I.B., Glushakova T.N. On solvability of the inverse trajectory problems. *Vestnik voronejskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionniye tehnologii*. 2007;(1):148-151.
31. SKYLAB Low Power Consumption Waterproof Bluetooth beacon -VG02. URL: <http://www.skylabmodule.com/skylab-low-power-consumption-waterproof-bluetooth-eddystone-nordic-chipset-beacon-itag-bluetooth-beacon-vg02/> (date of access 01.06.2020)
32. Dulimarta H.S., Jain A.K. Mobile robot localization in indoor environment. *Pattern Recognition*. 1997;30(1):99-111.
33. Ranganathan P., Hayet J.B., Devy M., Hutchinson S., Lerasle F. Topological navigation and qualitative localization for indoor environment using multi-sensory perception. *Robotics and Autonomous Systems*. 2002;41(2-3):137-144.
34. Barabanova L.P. On the geometric factor of difference range positioning with a minimal number of beacons. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2005;44(3):413-420.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Гриняк Виктор Михайлович, д-р. техн. наук, доцент, кафедра Информационных технологий и систем, ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса», Владивосток, Российская Федерация. *e-mail*: victor.grinyak@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0549-230X

Victor M. Grinyak, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Information Technologies Department, Federal State State-financed Educational Institution of Higher Education “Vladivostok State University of Economics and Service”, Vladivostok, Russian Federation