

УДК 004.8

В. М. Гриняк

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток, Россия

Оценка реализуемости 3D-позиционирования внутри помещений на основе bluetooth-устройств

В настоящее время получил распространение особый класс навигационных систем – системы позиционирования внутри помещений. Их главная особенность заключается в плохой доступности сигнала традиционных спутниковых средств навигации (GPS, Гло-насс), а это является побудительным мотивом использования альтернативных источников навигационных данных: инерциальных навигационных средств (акселерометры, гироскопы), устройств передачи данных Bluetooth и Wi-Fi, магнитометра, компаса, датчиков атмосферного давления и т.д. Системы позиционирования на основе Bluetooth-маяков получили широкое распространение, поскольку использование таких датчиков имеет множество преимуществ. Прежде всего, это возможность произвольного конфигурирования маяков в помещении в силу их автономности и малого размера. Использование недорогого и распространенного оборудования не требует специальных профессиональных навыков персонала, что упрощает разработку, внедрение и эксплуатацию системы. 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 определять характерную погрешность оценки координат позиционируемых объектов и при необходимости изменять конфигурацию маяков. Предлагается модельная интерпретация задачи позиционирования в виде системы алгебраических линейных уравнений и задачи метода наименьших квадратов. 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 натурных экспериментов, подтверждающих расчёты. В целом исследование оптимистично оценивает перспективы решения 3D-задач позиционирования внутри помещений с помощью Bluetooth-маяков.

Гриняк Виктор Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных технологий и систем; e-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru

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

V.M. Grinyak

Vladivostok State University of Economics and Service

Vladivostok, Russia

Feasibility Study of 3D Indoor Positioning System Based on Bluetooth Beacons

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.

Введение

Задачи позиционирования внутри помещений в настоящее время выделились как самостоятельный класс навигационных задач, которые характеризуются особыми математическими моделями и алгоритмами, архитектурой программных решений, учитывающей особенности датчиков и программно-аппаратных платформ [29]. 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 невалидными (ограниченное

число видимых спутников, неустойчивый приём их данных, низкая точность определения высоты объекта над поверхностью Земли – «проблема этажа») [23]. В качестве таких альтернативных источников 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. [13; 20; 24]. Их данные могут использоваться как отдельно, так и совместно, в зависимости от решаемой задачи.

В настоящее время решения общего назначения на основе данных Wi-Fi и Bluetooth являются наиболее распространёнными [1; 3; 19]. 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 построение инфраструктуры на базе недорогого и распространённого оборудования, не требующего специальных профессиональных навыков персонала; возможность практически произвольного конфигурирования датчиков в помещении в силу их малого размера и автономности (не нужно подводить электропитание). Потенциальная точность позиционирования на основе данных Bluetooth выше, чем у Wi-Fi. Кроме того, дальность видимости Bluetooth-устройств невелика, их сигнал плохо проходит сквозь капитальные стены, что решает «проблему этажа».

Применение инерциальных датчиков привлекает автономностью и отсутствием привязки к внешней инфраструктуре, однако практическая польза от него только в случае использования измерительных устройств высокой точности, что возможно лишь для систем специального назначения [12; 14; 15]. Имеются также сведения о разработках систем оптического типа, когда сравниваются данные сканирования помещения и изображения с камеры (в т.ч. кругового обзора) [25; 34]. Такие системы требуют больших вычислительных ресурсов, используются только в «контрастных» помещениях с хорошей освещённостью и 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 – определение местоположения объекта путём сравнения уровней сигнала от «видимых» датчиков с заранее измеренными значениями, привязанными к карте помещения (радиокарта, радиоотпечаток) [6; 27; 30]. Другой распространённый способ – решение задачи мультилатерации [4; 22]. В этом случае по уровню принимаемого сигнала оцениваются дальности «объект-датчик». Этот способ аналогичен используемому, например, в гидроакустике [5; 18]. Оба способа методологически схожи, так как имеют одинаковую информационную базу – измерения уровней сигнала в течение некоторого времени. При первом способе необходимо предварительно создать базу данных радиоотпечатка. Вторым способом требует предварительной калибровки датчиков и решения задачи глобальной и местной координатной привязки (выставки) системы [28].

Традиционно системами позиционирования внутри помещений решаются 2D навигационные задачи, известные реализации дают представления о характерной погрешности их решения [9; 10; 11]. 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 [21; 25]. Главной проблемой построения системы позиционирования для воздушных объектов является достижение требуемой точности определения их местоположения во всех трёх осях. Другими словами, необходимо априорно оценить 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. Цель статьи – 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.

Основные модельные представления

Кортеж данных, передаваемых маяком Bluetooth, содержит довольно ёмкую информацию о его работе. Уникальный идентификатор устройства и относительный уровень мощности принимаемого от него на объекте сигнала являются основными данными для решения задачи позиционирования. Единицей измерения уровня мощности радиосигнала, используемой в распространённых программных платформах, служит дБм. Уровень сигнала и дальность «объект–маяк» связаны следующим известным соотношением [31]:

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

где u – уровень сигнала, принимаемого объектом,

d – расстояние от объекта до маяка,

u_* – калибровочный уровень сигнала, измеренный на калибровочном расстоянии d_* от устройства,

n – коэффициент поглощения сигнала окружающей средой.

Параметры d_* и u_* являются задаваемыми техническими характеристиками конкретного маяка. Параметр затухания сигнала в среде n также считается известным. Значения n , d_* и u_* могут быть определены при калибровке маяка.

Введём правую ортогональную систему координат x, y, z , связанную с помещением. Пусть имеется N маяков, сигнал которых доступен на позиционируемом объекте. Дальность «объект–маяк» задаётся 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 происходит в течение некоторого отрезка времени. Уравнения измерений будут в этом случае иметь вид:

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

где $u_i(t_k)$ – уровень сигнала i -го маяка, принимаемого на объекте в момент времени t_k , x_i ,

y_i, z_i – координаты i -го маяка,

$x(t_k), y(t_k), z(t_k)$ – координаты позиционируемого объекта в момент времени t_k ,

u_{*i} и d_{*i} – калибровочные значения уровня сигнала и расстояния i -го маяка,

$\eta_i(t_k)$ – случайная величина инструментальной погрешности измерения i -го маяка, отнесённая к моменту времени t_k ,

$k = \overline{1, M}$, M – число измерений от каждого маяка.

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.

Пусть координаты объекта считаются неизвестными искомыми величинами. Широко распространённым общим подходом к решению задач типа (1) или (1), (2) является их линеаризация около некоторого опорного решения, включающего в себя априорные представления о координатах 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:

$$\delta Z = H \delta s(t_*) + \xi, \quad (4)$$

где δZ – полный вектор (длины $M \times N$) невязок измерений на интервале наблюдения,

$\delta s(t_*)$ – вектор погрешностей априорных представлений о координатах или координатах и скоростях объекта в выбранный момент времени t_* ,

H – матрица коэффициентов,

ξ – вектор приведённых погрешностей измерений.

Зададим матрицу $Q = \text{mean}[\xi\xi^T]$ – ковариационную матрицу случайного вектора ξ . Она определяется статистическими свойствами инструментальных погрешностей измерений $\eta_i(t_k)$ и считается известной. Матрица $D = (H^T Q^{-1} H)^{-1}$ является матрицей дисперсии погрешности оценки вектора состояния $\delta\hat{s}(t_*)$, таким образом: $D = \text{mean}[9\delta\hat{s}(t_*) - \delta s(t_*)(\delta\hat{s}(t_*) - \delta s(t_*))^T]$. Здесь mean – оператор математического ожидания.

Существует три аспекта разрешимости рассматриваемой задачи (1). Первый аспект – принципиальная разрешимость (существование и единственность решения) – интерпретируется полнотой ранга матрицы H . Второй – устойчивость решения по Ж. Адамару – обусловленностью задачи. Третий аспект – качество решения в условиях погрешности измерений – значением соответствующих коэффициентов матрицы D .

Принципиальная разрешимость. Так как система функций времени, образующих коэффициенты матрицы системы алгебраических линейных уравнений (3), в общем случае линейно независима, можно говорить о принципиальной разрешимости рассматриваемой задачи (1). Однако существуют и запрещённые (ненаблюдаемые) опорные решения, которые приводят систему уравнений (3) к вырождению. К таким решениям относятся случаи, когда все маяки и позиционируемый объект находятся в одной плоскости [7; 8].

Устойчивость решения. Устойчивость решения в условиях погрешностей вычислений на ЭВМ может быть определена следующим достаточным условием [17]:

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

где μ – вычисленное значение числа обусловленности матрицы H по отношению к её спектральной норме,

μ_* – некоторое критическое число.

Известно несколько подходов к определению критического числа обусловленности. Например, в ряде практических задач хорошо зарекомендовала себя такая оценка [16]:

$$\mu_* = \frac{1}{[\sqrt{u}(2u-3)(4u+27)+11]e_1},$$

где u – размерность вектора $\delta s(t_*)$,

ϵ_1 – относительная точность представления вещественных чисел, например, при удвоенной (double) точности чисел с плавающей точкой $\epsilon_1 \approx 10^{-16}$.

Если теперь 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 [9; 10; 11], было показано, что в рассматриваемой задаче матрица D хорошо описывает вероятностные свойства как её линеаризованного варианта (3), так и основного, исходно нелинейного (1). Значения соответствующих коэффициентов матрицы D позволяют оценить характерную погрешность определения координат объекта при той или иной заданной конфигурации системы маяков, используемых для позиционирования внутри помещения, и различном числе используемых измерений. Это позволяет решить поставленную задачу априорной оценки погрешности позиционирования.

Результаты расчётов и натурных экспериментов

При проведении натурных исследований использовались Bluetooth-маяки SKYLAB Beacon VG01 [33] и мобильный телефон HUAWEI WAS-LX1 на платформе Android в качестве позиционируемого объекта. Инструментальная погрешность измерений уровня сигнала маяков $\eta_i(t_k)$ была определена при их калибровке как нормально распределенная случайная величина с дисперсией $25(\text{дБм})^2$; количество измерений M от каждого маяка принималось равным 50, что соответствует интервалу наблюдения приблизительно 3–5 секунд. Оценка координат объекта осуществлялась методом мультилатерации (3).

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

Таблица 1

Варианты расположения маяков в помещении

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 (маяки расположены на полу по углам помещения). Реальное расположение объекта показано чёрным кружком. Оценка его местоположения –

черными 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 . Очевидно, что реальная погрешность позиционирования вполне соответствует её априорной оценке.

Так, при расположении объекта в центре помещения на высоте 3 м (рис. 1а) погрешность позиционирования составила около 0,5 м по «плоским» координатам и около 1 м по вертикали. При приближении объекта к маякам (рис. 1б и 1в) точность определения высоты улучшается. Если объект находится на высоте 1 м (рис. 1г, 1д и 1е), точность оценки высоты ухудшается примерно в 2 раза за счёт изменения условий наблюдения. Пример рис. 1 показывает, что в рассмотренном помещении четырёх маяков недостаточно для качественного решения задачи.

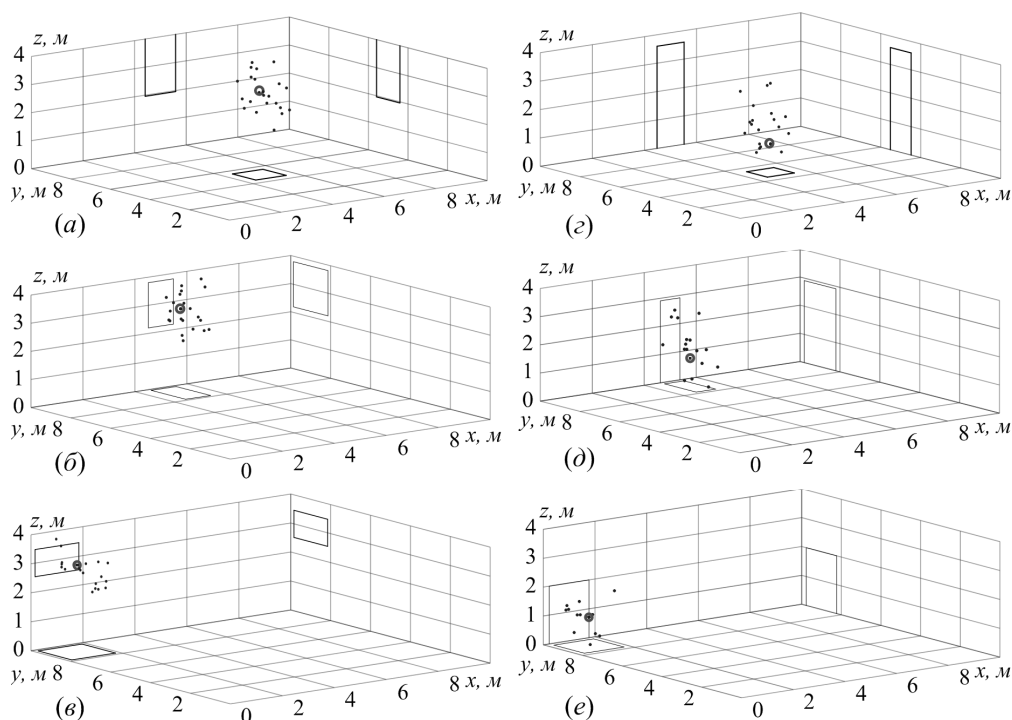


Рис. 1. Результаты позиционирования объекта для варианта 4 маяков

На рисунке 2 показаны результаты позиционирования объекта в случае 8 маяков (маяки 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 $x = 1, y = 9, z = 2$ (рис. 2е) погрешность оценки местоположения составила около 0,5 м по плоским координатам и меньше 0,3 м по высоте. Уменьшение погреш-

ности 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 [2; 26; 32]. Вместе с тем, если объект находится в середине помещения (рис. 2г), точность оценки высоты остаётся невысокой (около 1 м) из-за удалённости от маяков.

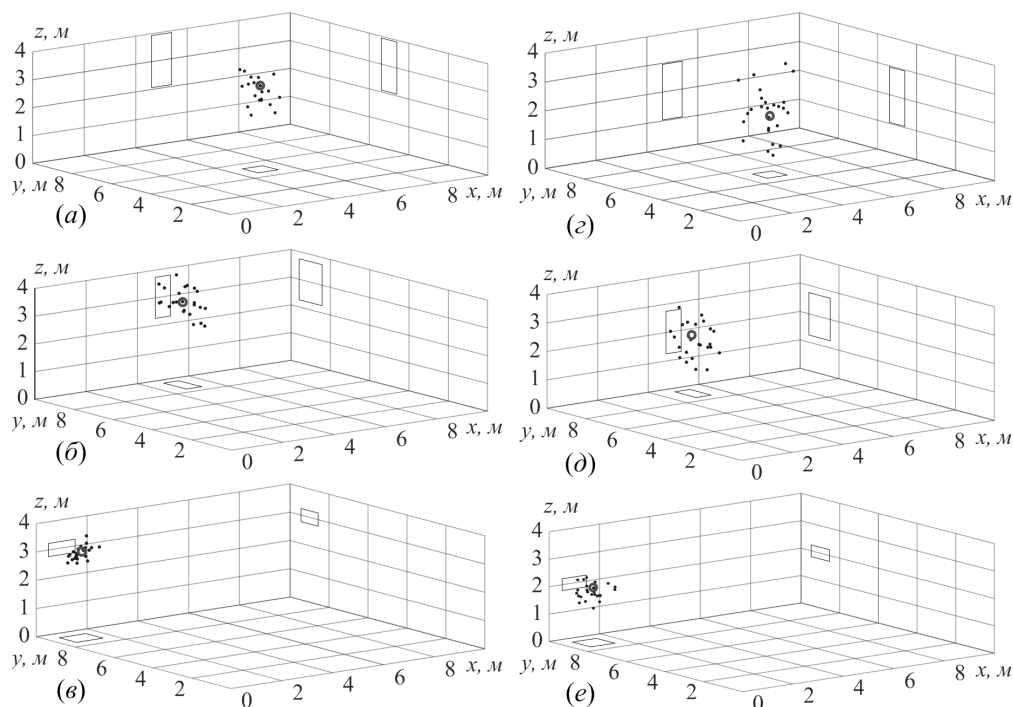


Рис. 2. Результаты позиционирования объекта для варианта 8 маяков

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 (рис. 3г) среднеквадратичное отклонение оценки координат объекта составляет менее 0,2 м, что даёт возможность безопасно позиционировать небольшой летающий дрон.

Приведённые на рис. 1–3 данные показывают, что применение устройств типа Bluetooth-маяков 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.

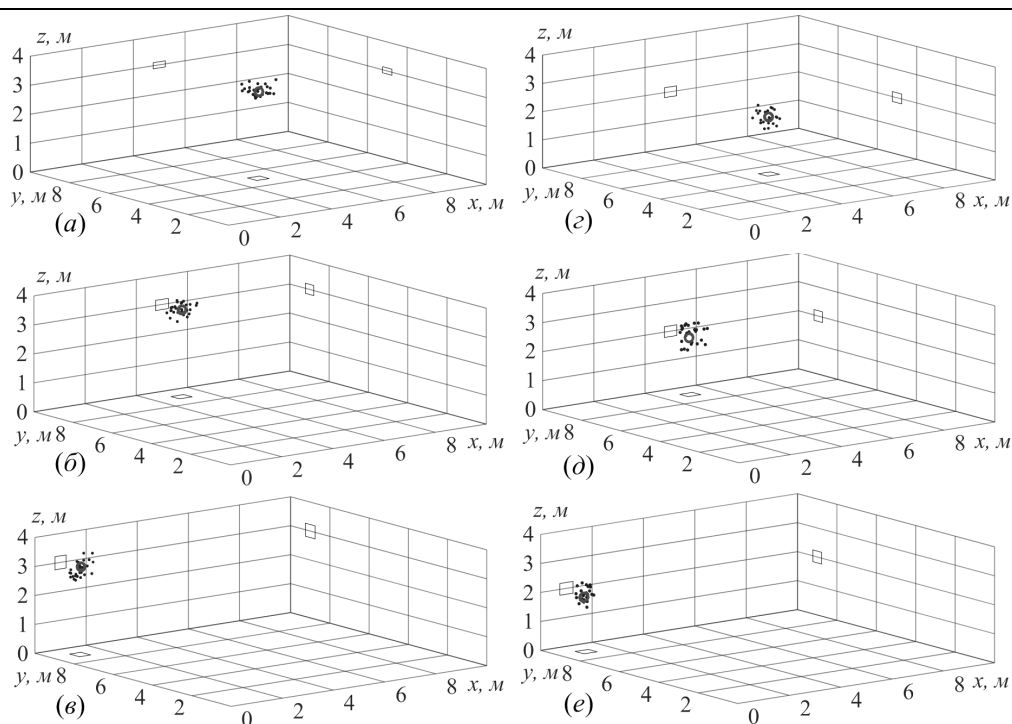


Рис. 3. Результаты позиционирования объекта для варианта 17 маяков

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 1–3 были рассчитаны для случая покоящегося объекта. Точность решения задачи в случае ее дополнения моделью движения объекта (3) будет

в 2–4 раза ниже – в зависимости от скорости и направления движения [9; 10; 11]. Кроме того, 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 примере целесообразно добавить маяки (10–20 шт.), расположив их на стенах и потолке помещения.

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. Общей проблемой всех задач, решаемых путём линеаризации около опорного решения, является локальность свойств такой оценки. Проведённые вычислительные и натурные эксперименты показывают, что в рассматриваемой задаче позиционирования свойства линеаризованной модели достаточно адекватно описывают исходную нелинейную задачу. Предложенный способ в принципе позволяет спроектировать систему позиционирования, работающую с требуемой точностью.

Результаты исследования рисуют оптимистичные перспективы решения 3D-задач позиционирования внутри помещений с помощью Bluetooth-маяков. При достаточном количестве маяков и их правильной 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 измерениях дальностей «объект–маяк», в том числе и для метода радиопечатка в помещениях с большим числом стен.

1. 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.
2. Барабанова Л. П. О геометрическом факторе разностно-дальномерного позиционирования с минимальным числом маяков // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2005. – №3. – С. 89–96.
3. Болотова С. Ю., Зонов А. В., Тютин А. П. Навигация внутри помещений в мобильных приложениях // Программная инженерия. – 2018. – Т. 9, №1. – С. 29–34.
4. Обоснование методов оптимального оценивания параметров движения цели в триангуляционной измерительной системе / В. Ю. Булычев, Ю. Г. Булычев, С. С. [и др.] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2015. – №4. – С. 94.
5. Васильев К. К., Бобков А. В. Динамическое использование ориентиров для оценки координат автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – №12. – С. 11–14.

6. Воронов Р. В., Малодушев С. В. Динамическое создание карт уровня WiFi-сигналов для систем локального позиционирования // Системы и средства информатики. – 2014. – Т. 24, №1. – С. 80–92.
7. Гриняк В. М. Исследование пространственной задачи навигации в условиях неполной измерительной информации // Дальневосточный математический журнал. – 2000. – Т. 1, №1. – С. 93–101.
8. Гриняк В. М., Гриняк Т. М., Иваненко Ю. С. Динамическая выставка многопозиционной системы наблюдения // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2017. – №3 (18). – С. 12.
9. 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. – Т. 10, №2 (41). – С. 137–147.
10. Возможности позиционирования внутри помещений с помощью Bluetooth-устройств / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, В. И. Люлько, П. А. Цыбанов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Т. 6, №2 (21). – С. 132–143.
11. Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Шурыгин А. В. Оценка возможностей использования Bluetooth-устройств для навигации внутри помещений // Информационные технологии. – 2018. – Т. 24, №9. – С. 610–617.
12. Навигационный алгоритм с использованием планов зданий и данных автономных датчиков / П. Дэвидсон, М. Киркко-Яаккола, Ю. З. Коллин, Я. Такала // Гироскопия и навигация. – 2015. – №1. – С. 29–42.
13. Желамский М. В. Особенности создания поля позиционирования для локальной навигации в закрытых пространствах // Измерительная техника. – 2014. – №7. – С. 40–44.
14. 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 радиориентиров // Гироскопия и навигация. – 2017. – №1. – С. 3–17.
15. Кроненветт Н., Руппельт Я., Троммер Г. Ф. Прецизионное позиционирование пешехода в помещении на основе контроля за стадиями его походки // Гироскопия и навигация. – 2017. – №1. – С. 33–48.
16. Крыжко И. Б., Глушакова Т. Н. Численное исследование разрешимости обратных траекторных задач // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2007. – №1. – С. 148–151.
17. Малышев А. Н. Введение в вычислительную линейную алгебру. – Новосибирск: Наука, 1991.
18. Разработка системы локального акустического позиционирования на базе персонального компьютера / М. В. Мартынюк, А. В. Генералов, С. С. Наумов [и др.] // Измерительная техника. – 2015. – №10. – С. 68–71.
19. 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. – С. 119–127.
20. Намиот Д. Е., Макарычев И. П. Об альтернативной модели отметки местоположения в социальных сетях // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8, №2. – С. 74–90.
21. Новая система навигации и наведения микролетательных аппаратов, способных беспрепятственно проникать в здания / М. Попп, С. Профет, Г. Шольц, Г.Ф Троммер // Гироскопия и навигация. – 2015. – №2 (89). – С. 3–17.

22. Салех Х. М., Александров Д. В. Радиолокация с использованием Wi-Fi-точек доступа беспроводных сетей внутри помещений // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012. – Т. 10, №7. – С. 29–36.
23. Шебшаевич В. С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. – Москва: Радио и связь, 1993. – 408 с.
24. Щёкотов М. С., Кашевник А. М. Сравнительный анализ систем позиционирования смартфонов в помещениях // Труды СПИИРАН. – 2012. – №4. – С. 459–471.
25. Anbarasu B., Anitha G. Indoor Scene recognition for Micro Aerial Vehicles Navigation using Enhanced SIFT-ScSPM Descriptors // The Journal of Navigation. – 2020. – Vol. 73, №1. – P. 37–55.
26. Dulimarta H. S., Jain A. K. Mobile robot localization in indoor environment // Pattern Recognition. – 1997. – Vol. 30, №1. – P. 99–111.
27. Indoor navigation service based on Wi-Fi positioning / D. V. Gmar, K. I. Dyuldina, S. I. Snopko, K. J. Shakhgeldyan, V. V. Kryukov // RPC 2017 – Proceedings of the 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications, 2017. – С. 68–71.
28. 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. – Vol. 38, №1. – С. 124–130.
29. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. – URL: <http://ipin-conference.org/> (дата обращения: 01.06.2020).
30. 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. – С. 568–571.
31. 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.
32. Topological navigation and qualitative localization for indoor environment using multi-sensory perception / P. Ranganathan, J. B. Hayet, M. Devy, S. Hutchinson, F. Lerasle // Robotics and Autonomous Systems. – 2002. – Vol. 41, № 2-3. – С. 137–144.
33. 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/> (01.06.2020)
34. Vision-Based Indoor Positioning (VBIP) – an Indoor AR Navigation System with a Virtual Tour Guide / H.-Y. Tsai, R. Hishiyama, Y. Kuwahara, Y. Leiri // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Т. 11677 LNCS. – С. 96–109.

Транслитерация

1. Assur O. S., Filaretov G. F. Razrabotka kompleksnogo metoda pozicionirovaniya ob'ektov po dannym besprovodnyh setej Wi-Fi i ustrojstv BLE (Bluetooth Low Energy) // Izvestiya Instituta inzhenernoj fiziki. – 2015. – №2. – S. 2–10.
2. Barabanova L. P. O geometricheskom faktore raznostno-dal'nomernogo pozicionirovaniya s minimal'nym chislom mayakov // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya. – 2005. – №3. – S. 89–96.
3. Bolotova S. Yu., Zonov A. V., Tyutin A. P. Navigaciya vnuti pomeshchenij v mobil'nyh prilozheniyah // Programmnyaya inzheneriya. – 2018. – Т. 9, №1. – S. 29–34.
4. Obosnovanie metodov optimal'nogo ocenivaniya parametrov dvizheniya celi v triangulyacionnoj izmeritel'noj sisteme / V. Yu. Bulychev, Yu. G. Bulychev, S. S. [i dr.] // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya. – 2015. – №4. – S. 94.
5. Vasil'ev K. K., Bobkov A. V. Dinamicheskoe ispol'zovanie orientirov dlya ocenki koordinat avtonomnyh neobitaemyh podvodnyh apparatov // Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. – 2017. – №12. – S. 11–14.

6. Voronov R. V., Malodushev S. V. Dinamicheskoe sozdanie kart urovnya WiFi-signalov dlya sistem lokal'nogo pozicionirovaniya // *Sistemy i sredstva informatiki*. – 2014. – Т. 24, №1. – S. 80–92.
7. Grinyak V. M. Issledovanie prostranstvennoj zadachi navigacii v usloviyah nepolnoj izmeritel'noj informacii // *Dal'nevostochnyj matematicheskij zhurnal*. – 2000. – Т. 1, №1. – S. 93–101.
8. Grinyak V. M., Grinyak T. M., Ivanenko Yu. S. Dinamicheskaya vystavka mnogopozicionnoj sistemy nablyudeniya // *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii*. – 2017. – №3 (18). – S. 12.
9. Grinyak V. M., Grinyak T. M., Cybanov P. A. Pozicionirovanie vnutri pomeshchenij s pomoshch'yu Bluetooth-ustrojstv // *Territoriya novyh vozmozhnostej. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa*. – 2018. – Т. 10, №2 (41). – S. 137–147.
10. Vozmozhnosti pozicionirovaniya vnutri pomeshchenij s pomoshch'yu Bluetooth-ustrojstv / V. M. Grinyak, A. S. Devyatisil'nyj, V. I. Lyul'ko, P. A. Cybanov // *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii*. – 2018. – Т. 6, №2 (21). – S. 132–143.
11. Grinyak V. M., Devyatisil'nyj A. S., Shurygin A. V. Ocenka vozmozhnostej ispol'zovaniya Bluetooth-ustrojstv dlya navigacii vnutri pomeshchenij // *Informacionnye tekhnologii*. – 2018. – Т. 24, №9. – S. 610–617.
12. Navigacionnyj algoritm s ispol'zovaniem planov zdaniy i dannyh avtonomnyh datchikov / P. Devidson, M. Kirkko-Yaakkola, Yu. 3 Kollin, Ya. Takala // *Giroskopiya i navigaciya*. – 2015. – №1. – S. 29–42.
13. Zhelamskij M. V. Osobennosti sozdaniya polya pozicionirovaniya dlya lokal'noj navigacii v zakrytyh prostranstvah // *Izmeritel'naya tekhnika*. – 2014. – №7. – S. 40–44.
14. Emel'yancev G. I., Stepanov A. P., Blazhnov B. A. O reshenii navigacionnoj zadachi dlya letatel'nyh apparatov s ispol'zovaniem inercial'nogo modulya na mikromekha-nicheskikh datchikah i nazemnyh radioorientirov // *Giroskopiya i navigaciya*. – 2017. – №1. – S. 3–17.
15. Kronenvett N., Ruppel't Ya., Trommer G. F. Precizionnoe pozicionirovanie peshehoda v pomeshchenii na osnove kontrolya za stadiyami ego pohodki // *Giroskopiya i navigaciya*. – 2017. – №1. – S. 33–48.
16. Kryzhko I. B., Glushakova T. N. Chislennoe issledovanie razreshimosti obratnyh traektornyh zadach // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii*. – 2007. – №1. – S. 148–151.
17. Malyshev A. N. Vvedenie v vychislitel'nyuyu linejnuyu algebru. – Novosibirsk: Nauka, 1991.
18. Razrabotka sistemy lokal'nogo akusticheskogo pozicionirovaniya na baze personal'nogo komp'yutera / M. V. Martynyuk, A. V. Generalov, S. S. Naumov [i dr.] // *Izmeritel'naya tekhnika*. – 2015. – №10. – S. 68–71.
19. Murashko I. A., Hrabrov D. E. Metodika lokal'nogo pozicionirovaniya na osnovanii Wi-Fi-seti universiteta // *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaj'naga y'niversiteta imya Yanki Kupaly. Ser. 2: Matematyka. Fizika. Infarmatyka, Vylichal'naya tekhnika i kiravanne*. – 2015. – №2. – S. 119–127.
20. Namiot D. E., Makarychev I. P. Ob al'ternativnoj modeli otmetki mestopolozheniya v social'nyh setyah // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2020. – Т. 8, №2. – S. 74–90.
21. Novaya sistema navigacii i navedeniya mikroletatel'nyh apparatov, sposobnyh besprepyatstvenno pronikat' v zdaniya / M. Popp, S. Profet, G. Shol'c, G.F Trommer. // *Giroskopiya i navigaciya*. – 2015. – №2 (89). – S. 3–17.

22. Salekh H. M., Aleksandrov D. V. Radiolokaciya s ispol'zovaniem Wi-Fi-tochek dostupa besprovodnyh setej vnutri pomeshchenij // Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. – 2012. – Т. 10, №7. – С. 29–36.
23. Shebshaevich V. S. Setevye sputnikovye radionavigacionnye sistemy. – Moskva: Radio i svyaz', 1993. – 408 с.
24. Shchyokotov M. S., Kashevnik A. M. Sravnitel'nyj analiz sistem pozicionirovaniya smart-fonov v pomeshcheniyah // Trudy SPIIRAN. – 2012. – №4. – С. 459–471.

© В.М. Гриняк, 2020

Для цитирования: Гриняк В.М. Оценка реализуемости 3D-позиционирования внутри помещений на основе bluetooth-устройств // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2020. – Т. 12, № 3. – С. 110–124.

For citation: Grinyak V.M. Feasibility Study of 3D Indoor Positioning System Based on Bluetooth Beacons, *The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*, 2020, Vol. 12, № 3, pp. 110–124.

DOI [dx.doi.org/10.24866/VVSU/2073-3984/2020-3/110-124](https://doi.org/10.24866/VVSU/2073-3984/2020-3/110-124)

Дата поступления: 16.06.2020.