

В. М. Гриняк, д-р техн. наук, проф.,
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса

Проектирование системы 3D-позиционирования внутри помещений на основе Bluetooth-устройств¹

Обсуждается проблема навигации внутри помещений в условиях плохого качества или недоступности данных спутниковых навигационных систем. Рассматривается задача позиционирования объекта в трехмерном 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 расчетов ожидаемой точности решения задачи в различных характерных ситуациях и результаты натурных экспериментов, подтверждающих расчеты. 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

Введение

Задачи позиционирования внутри помещений в настоящее время выделены в 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 от спутниковых навигационных систем второго поколения (GPS, Глонасс) могут быть не валидными (число видимых спутников может быть ограничено, прием их данных — неустойчивым, точность определения высоты объекта над поверхностью Земли может быть низкой ("проблема этажа")) [2]. В качестве таких альтернативных источников навигационной информации 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 данные могут использоваться как по отдельности, так и совместно, в зависимости от решаемой задачи.

В настоящее время решения общего назначения на основе данных Wi-Fi и Bluetooth являются наиболее распространенными [6—8]. Причина этого в том, что при применении Wi-Fi возможно использование уже развернутых сетей передачи данных. Использование для задач навигации внутри помещений Bluetooth-устройств также имеет целый ряд преимуществ: это построение инфраструктуры на базе недорогого и распространенного 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, и это решает "проблему этажа".

¹Работа поддержана грантом РФФИ, проект 18-07-00132.

Применение инерциальных датчиков привлекает автономностью и отсутствием привязки к внешней инфраструктуре, однако практически полезно оно только в случае использования измерительных устройств высокой точности, что возможно лишь для систем специального назначения [9—11]. Имеются также сведения о попытках разработки систем оптического типа, когда сравниваются данные сканирования помещения и изображения с камеры (в том числе кругового обзора) [12, 13]. Такие системы требуют больших вычислительных ресурсов и могут использоваться только в "контрастных" помещениях с хорошей освещенностью, 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 путем сравнения уровней сигнала от "видимых" датчиков с заранее измеренными значениями, привязанными к карте помещения (радиоотпечаток, радиокарта) [14—16]. Другой распространенный способ — решение задачи трилатерации [17, 18]. В этом случае по уровню принимаемого сигнала оцениваются дальности "объект—датчик". 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 трех осях. Другими словами, необходимо априорно оценивать возможную точность позиционирования при известной конфигурации датчиков и спланировать (спроектировать) число и рас-

положение 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 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.

Основные модельные представления

Кортеж данных, передаваемых маяком Bluetooth, содержит довольно емкую информацию о его работе. Основными элементами данных для решения задачи позиционирования является уникальный идентификатор устройства и относительный уровень мощности принимаемого от него на объекте сигнала. Единицей измерения последнего, используемой в распространенных программных платформах, служит дБм. Уровень сигнала связан с дальностью "объект—маяк" следующим известным соотношением [26]:

$$u = u_* - 10n \lg(d/d_*).$$

Здесь u — уровень сигнала, принимаемого объектом, находящимся на расстоянии d от маяка; u_* — уровень сигнала (калибровочный уровень), измеренный на расстоянии d_* (калибровочное расстояние) от устройства; n — коэффициент затухания сигнала в окружающей среде. Параметры d_* и u_* являются настраиваемыми техническими характеристиками конкретного маяка. Параметр n также считается известным. Значения n , d_* и u_* могут быть определены при калибровке маяка.

Определим правую ортогональную систему координат x, y, z , связанную с помещением. Пусть имеются N маяков, "видимых" позиционируемым объектом. Дальность "объект—маяк" задается 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, $i = \overline{1, N}$.

Пусть измерение уровней сигнала проводится в течение некоторого отрезка времени. Уравнения измерений будут иметь следующий вид:

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

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 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, отнесенная 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 него; 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, характеризующего априорные представления о координатах и скоростях объекта. Линеаризация уравнения (1) приводит его к следующему виду:

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

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 $M \cdot N$) 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; $\boldsymbol{\xi}$ — вектор приведенных погрешностей измерений.

Введем матрицу $\mathbf{Q} = \text{mean}[\boldsymbol{\xi} \boldsymbol{\xi}^T]$ — ковариационную матрицу случайного вектора $\boldsymbol{\xi}$. Она задается свойствами инструментальных погрешностей измерений $\eta_i(t_k)$ и считается известной. Матрица $\mathbf{D} = (\mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H})^{-1}$ будет определять дисперсию погрешности оценки вектора состояния $\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*)$, так что $\mathbf{D} = \text{mean}[(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))^T]$. Здесь mean — оператор математического ожидания.

Следует отметить три аспекта разрешимости исходной задачи (1) и ее линеаризованного варианта (3). Первый — принципиальная разрешимость (существование и единственность решения) — интерпретируется полнотой ранга матрицы \mathbf{H} ; второй — устойчивость решения по Ж. Адамару — обусловленностью задачи; третий — погрешность решения в условиях погрешности измерений — значением соответствующих коэффициентов матрицы \mathbf{D} .

Принципиальная разрешимость. В силу линейной независимости в общем случае системы функций времени, образующих коэффициенты матрицы системы алгебраических линейных уравнений (3), можно говорить о принципиальной разрешимости рассматриваемой задачи позиционирования. Однако имеет место и существование запрещенных (ненаблюдаемых) опорных решений, приводящих систему уравнений (3) к вырождению. К таким решениям относятся случаи, когда все маяки и позиционируемый объект находятся в одной плоскости [27, 28].

Устойчивость решения. Для ответа на вопрос об устойчивости решения в условиях погрешностей вычислений на ЭВМ обратимся к следующему условию достаточного типа [29]:

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

где μ — вычисленное значение числа обусловленности матрицы \mathbf{H} по отношению к ее спек-

тральной норме, а μ_* — некоторое критическое число. Например, известна 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 (например, при удвоенной (double)) точности $\varepsilon_1 \approx 10^{-16}$. Если принять $u = 6$, то $\mu_* \forall 10^{-13}$. 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 ее линейризованного варианта (3), так и основного, исходно нелинейного варианта (1). Значения соответствующих коэффициентов матрицы \mathbf{D} позволяют оценить характерную точность определения координат объекта при той или иной заданной конфигурации системы маяков, используемых для навигации внутри помещения и различном числе используемых измерений. Это позволяет решить исходную поставленную задачу априорной оценки погрешности позиционирования.

Результаты расчетов и натуральных экспериментов

При проведении натуральных исследований использовались Bluetooth-маяки SKYLAB Beacon VG01 [31] и мобильный телефон HUAWEI WAS-LX1 на платформе Android в качестве позиционируемого объекта. Инструментальная погрешность измерений уровня сигнала маяков $\eta_i(t_i)$ была оценена при их калибровке как нормально распределенная случайная величина с дисперсией $25(\text{дБм})^2$; число измерений M от каждого датчика было принято равным 50, что соответствует длине интервала наблюдения приблизительно 3...5 с. Оценка координат объекта осуществлялась методом трилатерации (3).

Эксперименты проводили в помещении типа "холл" размером 10x10 м и высотой 4 м. Маяки располагались в вариантах, представленных в таблице. Позиционируемый объект покоился.

На рис. 1 показаны результаты позиционирования объекта в случае четырех маяков (расположены на полу по углам помещения). Реальное расположение объекта показано черным кружком. Оценка его местоположения — черными точками. В каждом случае проводили серию из

Варианты расположения маяков в помещении

Номер варианта	Число 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

30 последовательных формирований вектора измерений и оценок координат объекта.

Прямоугольниками на "стенах" и на "полу" показаны интервалы, соответствующие погрешностям оценивания координат объекта — среднеквадратичным отклонениям, определенным по значениям диагональных элементов матрицы \mathbf{D} . Из рис. 1 видно, что реальная погрешность позиционирования вполне соответствует ее априорной оценке.

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

На рис. 2 показаны результаты позиционирования объекта в случае восьми 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 $x = 1, y = 9, z = 2$ (рис. 2, е) погрешность оценки местоположения составила около 0,5 м по плоским координатам, и меньше 0,3 м по высоте. Уменьшение погрешности позиционирования идет как за счет роста числа маяков (и, соответственно, числа измерений), так и за счет улучшения условий наблюдения — маяки как бы "окружают" позиционируемый объект [32–34]. Вместе с тем, если объект находится в середине помещения (рис. 2, г) точность оценки высоты остается невысокой (около 1 м) из-за удаленности от маяков.

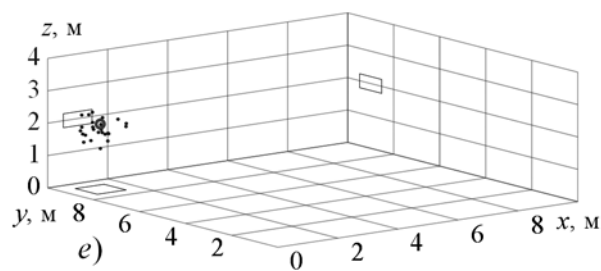
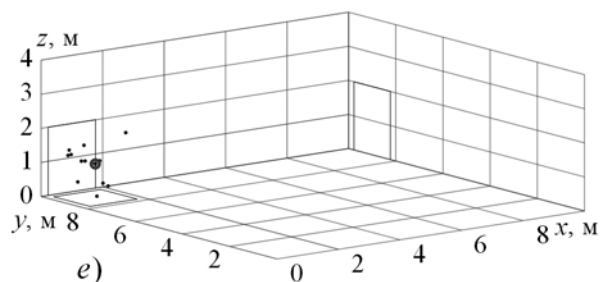
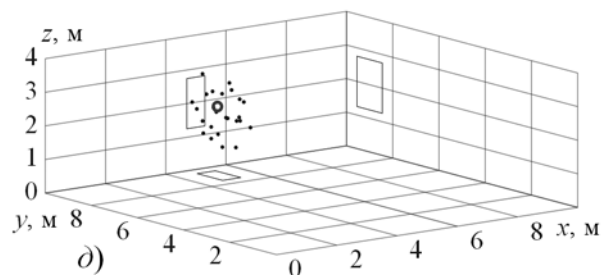
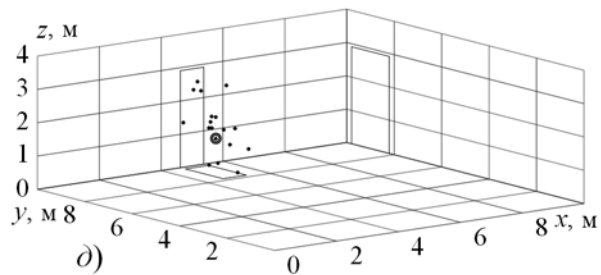
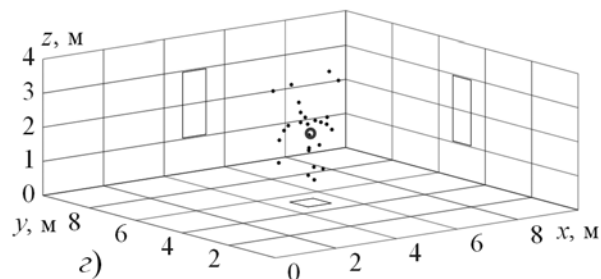
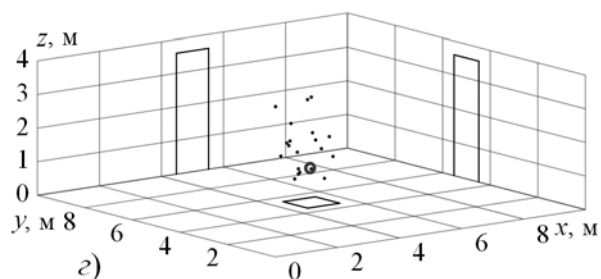
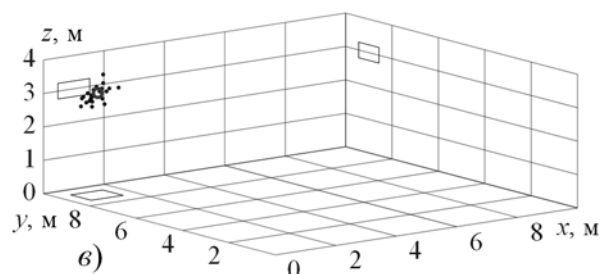
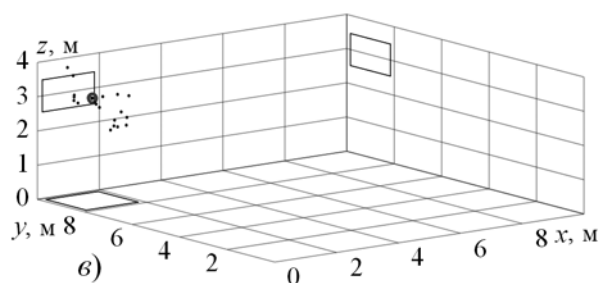
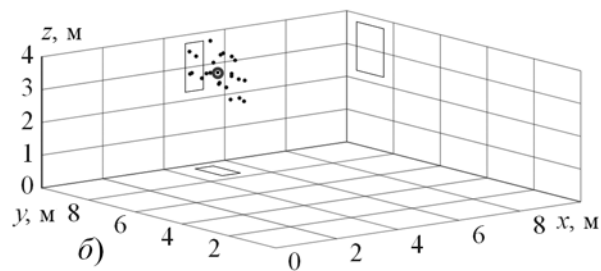
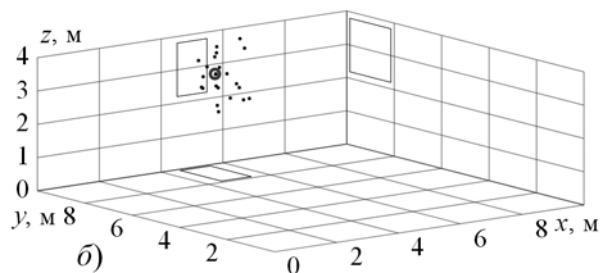
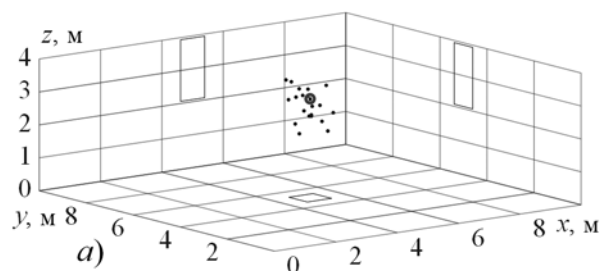
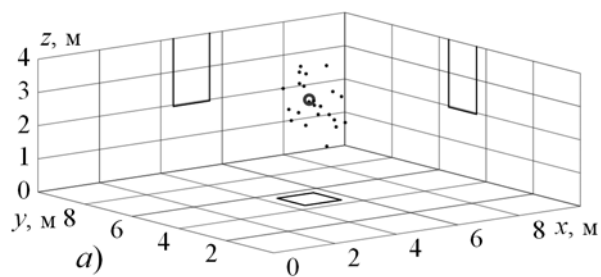


Рис. 1. Результаты позиционирования объекта для варианта 4 маяков

Рис. 2. Результаты позиционирования объекта для варианта 8 маяков

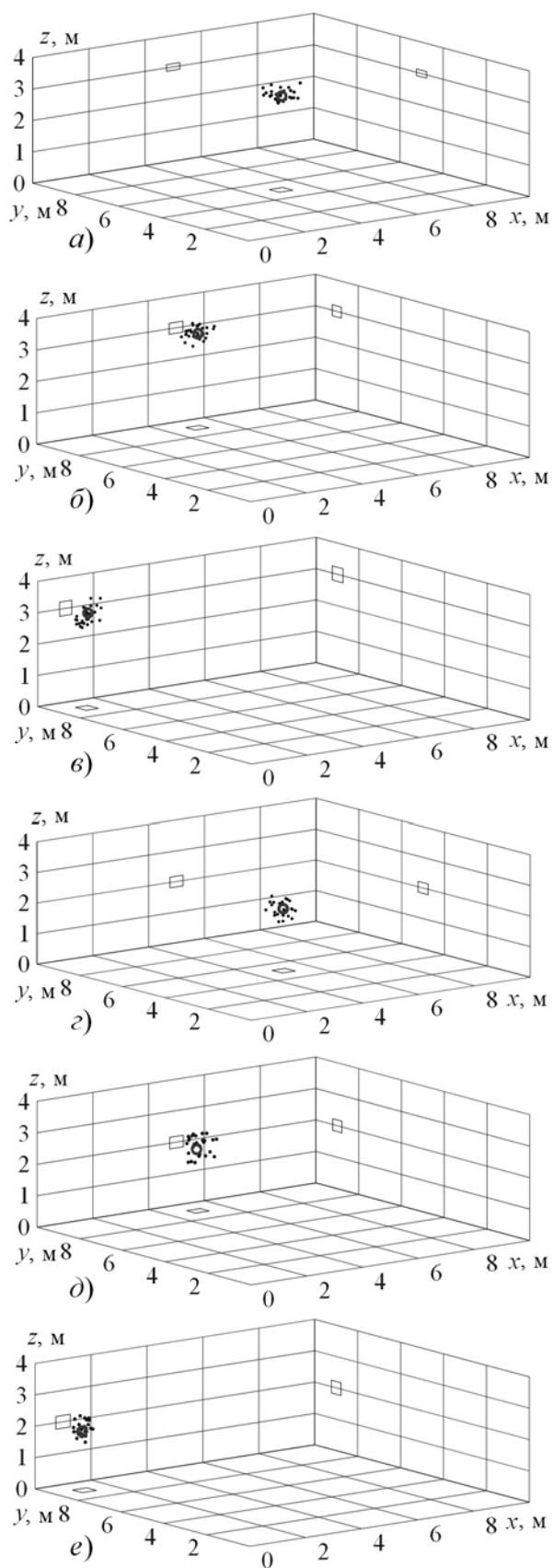


Рис. 3. Результаты позиционирования объекта для варианта 17 маяков

На рис. 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 трем координатам. Так, при нахождении объекта в середине комнаты (рис. 3, *г*) среднеквадратичное отклонение оценки координат объекта составляет менее 0,2 м, что дает возможность безопасно позиционировать небольшой летающий дрон.

Обсуждение

Приведенные на рис. 1–3 данные показывают, что применение устройств типа Bluetooth дает возможность качественного решения 3D-задачи позиционирования на характерных дальностях "объект–маяк" 3...6 м при достаточном числе 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 линеаризованными уравнениями (2);
- вычисление диагональных элементов матрицы \mathbf{D} ;
- если ожидаемая точность позиционирования в выбранной точке недостаточна — добавление маяков вблизи этой точки 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. Еще 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.

Рис. 1–3 были рассчитаны для случая походящегося 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 [22–24]. Кроме того, для движущегося объекта интервал наблюдения не может быть большим (обычно он не превышает 1...2 с). С учетом ограничений на период обновления буфера данных (0,05...0,5 с) это существенно уменьшает число 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 учетом 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 линеаризации около опорного решения является локальность его свойств. Проведенные натурные эксперименты показывают, что в рассматриваемой задаче позиционирования свойства линеаризованной модели достаточно хорошо описывают исходную нелинейную задачу. Предложенный способ позволяет спроектировать систему позиционирования, работающую с требуемой точностью.

Результаты исследования позволяют оптимистично взглянуть на перспективы решения 3D-задач позиционирования внутри помещений с помощью Bluetooth-маяков. При достаточном числе маяков и их удачной конфигурации реально достижимая точность позиционирования составляет порядка 0,2...0,3 м по всем трем 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, используемого в помещениях с большим числом стен.

1. **International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation.** URL: <http://ipin-conference.org/> (01.06.2020).
2. **Шебшаевич В. С.** Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
3. **Щекотов М. С., Кашевник А. М.** Сравнительный анализ систем позиционирования смартфонов в помещениях // Труды СПИИРАН. 2012. № 4. С. 459–471.
4. **Желамский М. В.** Особенности создания поля позиционирования для локальной навигации в закрытых пространствах // Измерительная техника. 2014. № 7. С. 40–44.
5. **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.
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. **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.
8. **Болотова С. Ю., Зонов А. В., Тютин А. П.** Навигация внутри помещений в мобильных приложениях // Программная инженерия. 2018. Т.9, № 1. С. 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. С. 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. С. 33–48.
11. **Емельянец 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.
12. **Anbarasu B., Anitha G.** Indoor Scene recognition for Micro Aerial Vehicles Navigation using Enhanced SIFT-ScSPM Descriptors // The Journal of Navigation. 2020. Vol. 73, N. 1. P. 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. Т. 11677 LNCS. P. 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. P. 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. P. 568–571.
16. **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.
17. **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.
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. С. 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. С. 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. С. 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. Vol. 38, N. 1. С. 124–130.
22. 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.
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. Т. 6, № 2 (21). С. 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. Т. 10, № 2 (41). С. 137–147.
25. Попп М., Профет С., Шольц Г., Троммер Г. Ф. Новая система навигации и наведения микролетательных аппаратов, способных беспрепятственно проникать в здания // Гирокоспия и навигация. 2015. № 2 (89). С. 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. Vol. 24, N. 12. P. 763–764.
27. Гриняк В. М. Исследование пространственной задачи навигации в условиях неполной измерительной информации // Дальневосточный математический журнал. 2000. Т. 1, № 1. С. 93–101.
28. Гриняк В. М., Гриняк Т. М., Иваненко Ю. С. Динамическая выставка многопозиционной системы наблюдения // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. № 3 (18). С. 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. С. 148–151.
31. SKYLAB Low Power Consumption Waterproof Bluetooth beacon-VG02. URL: <http://www.skylabmodule.com/skylab-low-power-consumption-waterproof-bluetooth-eddystone-nordic-chip-set-beacon-itag-bluetooth-beacon-vg02/> (01.06.2020).
32. Dulimarta H. S., Jain A. K. Mobile robot localization in indoor environment // Pattern Recognition. 1997. Vol. 30, N. 1. С. 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. Vol. 41, N. 2–3. С. 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. С. 89–96.

V. M. Grinyak, Ph.D. (Tech.), Professor,

Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russian Federation

Configuration 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

DOI: 10.17587/it.27.32-40

References

1. **International** Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, available at: <http://ipin-conference.org/> (date of access 01.06.2020).
2. **Shebshaevich V. S.** Network satellite radio navigation systems), Moscow, Radio i svjaz', 1993, 408 p. (in Russian).
3. **Shchekotov M., Kashevnik A.** Comparative Analysis of Indoor Positioning Systems for Smartphones, *Proc. FRUCT Conf.*, 2012, pp. 43–48 (in Russian).
4. **Zhelamskii M. V.** Features of the Construction of a Positioning Field for Local Navigation in Enclosed Spaces, *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 7, pp. 791–799 (in Russian).
5. **Namiot D., Makarychev I.** On the alternative model of location marking on social networks, *International Journal of Open Information Technologies*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 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), *Izvestiya Instituta Inzhenernoj Fiziki*, 2015, no. 2, pp. 2–10 (in Russian).
7. **Murashko I. A., Khrabrov D. E.** Methods of local positioning based on Wi-Fi-network of university, *Vesnik Grodzenskaga dzjarzhaj'naga y'niversitjeta imja Janki Kupaly. Seriya 2: Matjematyka. Fizika. nfarmatyka, Vylichal'naja tjehnika i kiravanne*, 2015, no. 2, pp. 119–127 (in Russian).
8. **Bolotova S. Yu., Zonov A. V., Tutin A. P.** Indoor Navigation in Mobile Applications, *Programmnaya Injeneriya*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 29–34 (in Russian).
9. **Davidson P., Kirkko-Jaakkola M., Collin J., Takala J.** Navigation Algorithm Combining Building Plans with Autonomous Sensor Data, *Gyroscopy and Navigation*, 2015, no. 3, pp. 188–196 (in Russian).
10. **Kronenwett N., Ruppelt J., Trommer G. F.** Motion Monitoring based on a Finite State Machine for Precise Indoor Localization, *Gyroscopy and Navigation*, 2017, no. 3, pp. 190–199 (in Russian).
11. **Emel'yantsev G. I., Stepanov A. P., Blazhnov B. A.** Solution of Aircraft Navigation Problem using MEMS IMU and Ground Radio Sources, Gyroscopy and Navigation (*Giroskopija i navigacija*), 2017, no. 1, pp. 3–17 (in Russian).
12. **Anbarasu B., Anitha G.** Indoor Scene recognition for Micro Aerial Vehicles Navigation using Enhanced SIFT-ScSPM Descriptors, *The Journal of Navigation*, 2020, vol. 73, no. 1, pp. 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, vol. 11677 LNCS, pp. 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, pp. 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, pp. 568–571.
16. **Voronov R. V., Malodushev S. V.** Dynamic Creation Of Wi-Fi-Signal Level Maps For Location Systems, *Systems and Means of Informatics*, 2014, no. 1, pp. 80–92 (in Russian).
17. **Saleh H. M., Aleksandrov D. V.** Indoor positioning using WI-FI-access points, *Informatsionno-Izmeritelnye i Upravlyaushie Systemy*, 2012, vol. 10, no. 7, pp. 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, vol. 54, no. 4, pp. 593–608.
19. **Vasiliev K. K., Bobkov A. V.** Dynamic use landmarks for coordinates estimation, *Informatsionno-Izmeritelnye i Upravlyaushie Systemy*, 2017, no. 12, pp. 11–14 (in Russian).
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, no. 10, pp. 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, vol. 38, no. 1, pp. 124–130.
22. **Grinyak V. M., Devyatisilny A. S., Shurygin A. V.** Feasibility Study of Indoor Navigation with Bluetooth Beacons, *Informatsionnye Tehnologii*, 2018, vol. 24, no. 9, pp. 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, vol. 6, no. 2 (21), pp. 132–143 (in Russian).
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, vol. 10, no. 2 (41), pp. 137–147 (in Russian).
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, no. 3, pp. 3–17 (in Russian).
26. **Motley A. J., Keenan J. M. P.** Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz, *Electronics Letters*, 1988, vol. 24, no. 12, pp. 763–764.
27. **Grinyak V. M.** Spatial navigation problem under incomplete measuring information conditions, *Dalnevostochnyi matematicheskij jurnal*, 2000, vol. 1, no. 1, pp. 93–101 (in Russian).
28. **Grinyak V. M., Grinyak T. M., Ivanenko Y. S.** Dynamic Adjustment of Multiposition Observing System, *Modelirovanie, Optimizacija i Informacionnye Tehnologii*, 2017, no. 3, pp. 12 (in Russian).
29. **Malyshev A. N.** Introduction to computing linear algebra, Novosibirsk, Nauka, 1991 (in Russian).
30. **Kryzhko I. B., Glushakova T. N.** On solvability of the inverse trajectory problems, *Vestnik voronejskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tehnologii*, 2007, no. 1, pp. 148–151 (in Russian).
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, vol. 30, no. 1, pp. 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, vol. 41, no. 2–3, pp. 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, vol. 44, no. 3, pp. 413–420.