

В. М. Гриняк, д-р техн. наук, проф.,
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
А. В. Шурыгин, студент,
Дальневосточный федеральный университет

Оценка возможностей использования bluetooth-устройств для навигации внутри помещений¹

Статья посвящена проблеме навигации внутри помещений в условиях ограничений на спутниковые средства (GPS, Глонасс), связанных с плохим качеством или недоступностью их данных. Рассматривается задача оценки местоположения объекта по данным устройств типа Bluetooth, основанная на измерениях уровня сигнала, интерпретирующего дальность "объект—датчик". Предлагается ее модельная интерпретация в виде системы алгебраических линейных уравнений и решение, основанное на классическом методе наименьших квадратов. Такое представление позволяет строить априорные теоретические оценки погрешности определения координат и скоростей объекта. В работе приводятся данные расчетов характерной точности решения задачи в различных характерных ситуациях, а также подтверждающие их результаты натурных экспериментов.

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

Введение

Задачи навигации — определения глобальных и относительных местных координат и их производных — являются важнейшим объектом приложения достижений информационных технологий. Еще два десятилетия назад они решались почти исключительно в специальных и отраслевых интересах (авиация, судоходство). После появления и массового вхождения в обиход современных мобильных устройств (в частности, смартфонов) произошел качественный скачок, и в настоящее время интерес к навигационным задачам имеется со стороны очень широкого круга бытовых потребителей.

Традиционные источники навигационных данных — спутниковые навигационные системы второго поколения (GPS, Глонасс) — позволяют очень точно определять местоположение в условиях наблюдения достаточного числа спутников, хорошего качества их сигнала и расположения объекта вблизи поверхности Земли. Эти

условия не всегда выполнимы внутри помещений, где число видимых спутников может быть ограничено, прием их данных может оказаться неустойчивым, а точность определения высоты объекта над поверхностью Земли — довольно низкой ("проблема этажа") [1]. В этом случае для определения местоположения объектов внутри помещения используются альтернативные источники навигационной информации: инерциальные навигационные средства (акселерометры, гироскопы), точки Wi-Fi-доступа в Интернет, устройства передачи данных Bluetooth, датчик давления, магнитометр и т. п. Их данные могут использоваться как по отдельности, так и совместно, в зависимости от решаемой задачи.

К настоящему времени навигация внутри помещений оформилась в самостоятельный класс задач [2]. С точки зрения информационных технологий эти задачи носят комплексный характер. Во-первых, они требуют разработки особых математических моделей и алгоритмов фундаментального характера для обеспечения навигационной компоненты. Во-вторых, для их реализации в виде информационных сервисов необходима разработка программных

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

комплексов специальной архитектуры, учитывая особенности программно-аппаратных платформ мобильных устройств.

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

◆ *Использование данных инерциальных датчиков.* В этом случае с помощью гироскопов и акселерометров мобильного устройства решается либо классическая задача инерциальной навигации, либо ее варианты, адаптированные к особенностям имеющихся датчиков и априорных данных о помещении и свойствах движения объекта [3–5]. Достоинством такого подхода является автономность и отсутствие привязки к внешней инфраструктуре. Вместе с тем устройствам бытового назначения инерциальные измерения доступны лишь с большой погрешностью, что не дает возможности решать задачу с приемлемой точностью. Это делает указанный подход практически полезным только для специальных устройств, оснащенных навигационными датчиками высокой точности.

◆ *Использование данных Wi-Fi/Bluetooth.* Первый способ использования таких данных — решение задачи типа трилатерации. В этом случае исходными данными для оценки координат наблюдаемого объекта служат измерения дальностей "объект—датчик", при этом дальность оценивается по уровню принимаемого мобильным устройством сигнала [6, 7]; такой способ аналогичен используемому, например, в гидроакустике [8–10]. Второй способ — определение местоположения объекта путем сравнения измеряемых уровней сигнала от окружающих датчиков с заранее измеренными значениями, привязанными к карте помещения (карта уровня сигналов, радиоотпечаток) [11–14]. К достоинствам подхода можно отнести возможность использования уже развернутых сетей передачи данных (Wi-Fi). Недостатками являются высокая погрешность измерения уровня сигнала, дискретность данных карт уровня сигналов, принципиально ограничивающая точность навигации, и необходимость предварительной калибровки и настройки (обучения) системы.

Имеются сведения о попытках разработки других подходов, например, системы оптического типа, когда сравниваются данные сканирова-

ния помещения и изображения с камеры смартфона [15], или системы, основанной на навигации по магнитному полю с помощью компаса смартфона [16]. Известны попытки комбинирования в одной системе позиционирования нескольких подходов одновременно [17–19].

Использование для задач навигации внутри помещений Bluetooth-устройств имеет целый ряд преимуществ. Во-первых, это построение инфраструктуры на базе недорогого и распространенного оборудования, не требующего специальных профессиональных навыков персонала. Во-вторых, возможность практически произвольного конфигурирования датчиков на стенах помещения в силу их малого размера и автономности (не нужно подводить электропитание), что дает возможность оптимизации условий наблюдения. В-третьих, дальность видимости Bluetooth-устройств невелика, а их сигнал практически не проходит сквозь капитальные стены, что полностью решает "проблему этажа".

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

Основные модельные представления

Передаваемые Bluetooth-устройством данные содержат довольно емкую информацию о его работе [20]. С точки зрения обсуждаемой задачи наиболее важными элементами данных являются уникальный идентификатор наблюдаемого устройства и относительный уровень мощности принимаемого от него сигнала (единицей измерения, используемой в смартфонах, обычно служит дБм). Уровень принимаемого сигнала связан с дальностью "объект—датчик" следующим известным соотношением [21]:

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

Здесь u — уровень сигнала, принимаемого мобильным устройством (объектом) на расстоянии d от Bluetooth-устройства (датчика); u_* — уровень сигнала, измеренный на расстоянии d_* от устройства; n — коэффициент, учитывающий распространение сигнала в окружающей среде. Значения параметров d_* и u_* — калибровочные расстояние и уровень сигнала — являются техническими характеристиками конкретного устройства, значение коэффици-

ента затухания n также считается известным. В принципе, эти значения могут быть определены при калибровке устройства.

Введем правую ортогональную систему координат x, y , связанную с помещением. Пусть имеются N датчиков, "видимых" мобильным устройством. Дальность "объект—датчик" связана с координатами объекта и датчика следующим образом:

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

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

Положим, что движение объекта описывается следующей кинематической моделью:

$$\begin{bmatrix} x(t_{k+1}) \\ v_x(t_{k+1}) \\ y(t_{k+1}) \\ v_y(t_{k+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_{k+1} - t_k & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t_{k+1} - t_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_k) \\ v_x(t_k) \\ y(t_k) \\ v_y(t_k) \end{bmatrix},$$

или, в общем виде,

$$\mathbf{s}(t_{k+1}) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t_k). \quad (1)$$

Здесь $x(t_k), y(t_k)$ — координаты объекта в момент времени t_k ; $v_x(t_k), v_y(t_k)$ — компоненты вектора скорости объекта. Вектор $\mathbf{s}(t_k)$ характеризует состояние системы в момент времени t_k .

С учетом вышесказанного уравнения измерений будут иметь следующий вид:

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

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

Таким образом, имеем модельную интерпретацию задачи навигации в виде "состояние—измерение" (1), (2). Методологически общим подходом к решению задач такого типа является их линеаризация около некоторого опорного решения, характеризующего априорные представления о векторе состояния системы, — в данном случае это предположения о координатах и скоростях объекта. Линеаризация уравнения (2) приводит его к виду

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

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

Популярными методами решения задач типа (1), (3) являются динамические алгоритмы статистически оптимального оценивания, усваивающие измерения последовательно, по мере поступления данных (алгоритм Калмана, модальные алгоритмы [22, 23]). Особенности программной реализации рассматриваемой задачи с накоплением и совместной обработкой данных измерений за некоторый период времени делают возможным альтернативный подход — сведение ее к методу наименьших квадратов, в пользу которого и сделан выбор в настоящей работе.

Запишем уравнения (3) с учетом модели эволюции состояния системы (1):

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

или, в общем случае,

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

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

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

и ее решения известными способами. Здесь $\mathbf{Q} = \text{mean}[\xi\xi^T]$ — ковариационная матрица случайного вектора ξ , она определяется свойствами инструментальных погрешностей измерений $\eta_i(t_k)$ и считается известной. Матрица $\mathbf{D} = (\mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H})^{-1}$ определяет при этом дисперсию погрешности оценки вектора состояния $\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*)$, так что $\mathbf{D} = \text{mean}[(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))^T]$; mean — оператор математического ожидания.

В рассматриваемой задаче матрица \mathbf{D} довольно точно описывает вероятностные свойства как ее линеаризованного варианта (1), (3), так и основного, исходно нелинейного (1), (2). Как показывают приведенные ниже результаты исследования, значения соответствующих коэффициентов матрицы \mathbf{D} вполне позволяют оценить характерную точность определения координат объекта при различных конфигурациях системы датчиков, используемых для навигации внутри помещения.

Результаты численного моделирования

Численное исследование задачи проводили для следующих значений параметров: инструментальная погрешность измерений датчиков имеет нормальное распределение с дисперсией 25 (дБм)^2 ; частота обновления данных об уровне сигнала равна $0,07 \text{ с}$, что характерно для современных смартфонов; число измерений M от каждого датчика равно 28 , что соответствует длине интервала наблюдения приблизительно 2 с .

На рис. 1 и 2 показано моделируемое расположение датчиков; имитируются следующие типичные ситуации: коридор шириной 3 м (рис. 1) и холл или комната размером $10 \times 10 \text{ м}$ (рис. 2).

Датчики "наклеены" на стены в различных конфигурациях: с одной стороны коридора (рис. 1, а, б), с двух сторон коридора (рис. 1, в), в углах комнаты (рис. 2, а), в углах и на стенах комнаты (рис. 2, б). При этом считается, что датчики расположены в одной плоскости с движущимся объектом (или достаточно близко к этой плоскости), что дает возможность ограничиться только двумерным вариантом модели рассматриваемой задачи.

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

На рис. 3, а показаны вычисленные согласно (5) значения средней погрешности оценивания координат объекта σ_{xy} в кинематической задаче:

$$\sigma_{xy} = \sqrt{D_{xx} + D_{yy}},$$

где D_{xx} и D_{yy} — соответствующие диагональные коэффициенты матрицы \mathbf{D} ; моделируется, что объект находится (движется) по середине коридора (см. рис. 1). На рис. 3 сплошная линия соответствует конфигурации датчиков, показанной на рис. 1, в, штриховая линия — на рис. 1, б, пунктирная линия — на рис. 1, а. Видно, что конфигурация системы датчиков и их расположение относительно объекта существенно влияет на погрешность оценивания. Так, при нахождении объекта дальше 7 м от

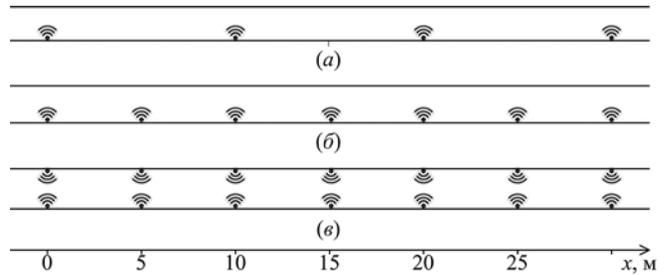


Рис. 1. Варианты расположения датчиков в помещении типа "коридор"

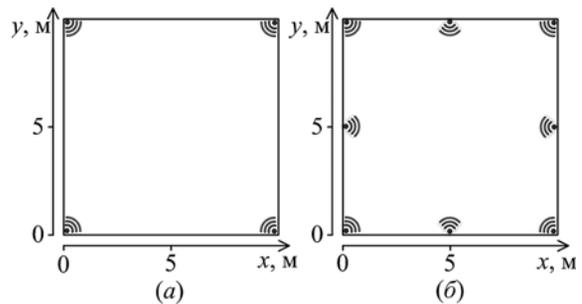


Рис. 2. Варианты расположения датчиков в помещении типа "холл" или "комната"

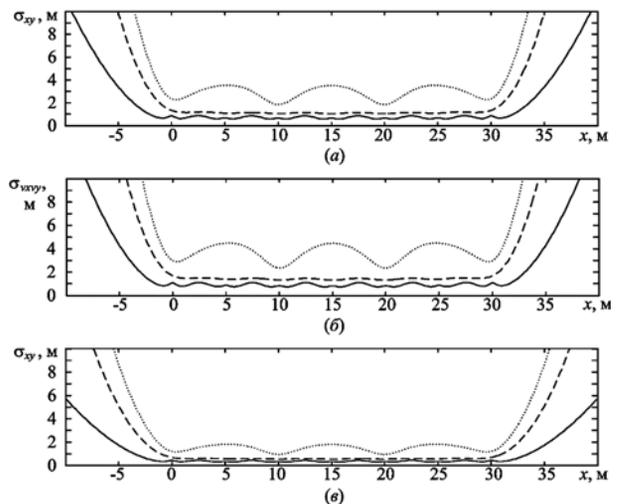


Рис. 3. Погрешность определения координат и скоростей объекта в помещении типа "коридор":

а и б — погрешность определения координат и скоростей в кинематической задаче; в — погрешность определения координат в статической задаче

системы датчиков (области графика $x < -7$ и $x > 37$) значение σ_{xy} становится неприемлемым во всех случаях (более 5 м). Если объект находится "внутри" системы датчиков (область графика $0 < x < 30$), значение σ_{xy} составляет от 1 (в случае, если датчики расположены на расстоянии 5 м друг от друга) до 3,5 м (если датчики расположены на расстоянии 10 м друг от друга). Расположение датчиков с двух сторон также улучшает условия наблюдения.

На рис. 3, б показаны значения средней погрешности оценивания скоростей объекта $\sigma_{v_x v_y}$ в кинематической задаче:

$$\sigma_{v_x v_y} = \sqrt{D_{v_x v_x} + D_{v_y v_y}},$$

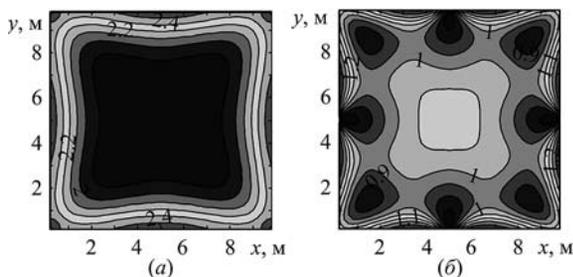


Рис. 4. Погрешность определения координат в помещении типа "комната" при оценке координат и скоростей объекта:
 а — случай четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, а);
 б — случай восьми маяков

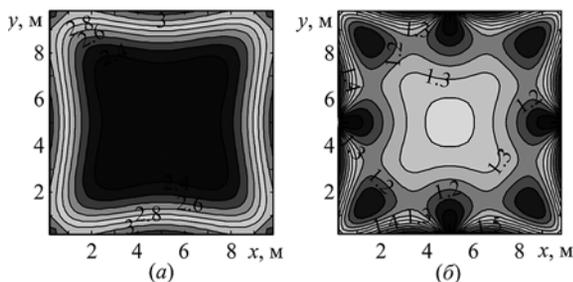


Рис. 5. Погрешность определения скорости в помещении типа "комната" при оценке координат и скоростей объекта:
 а — случай четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, а);
 б — случай восьми маяков

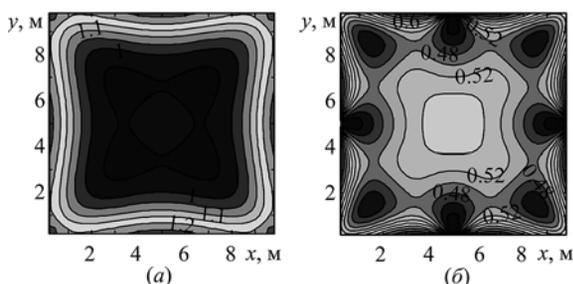


Рис. 6. Погрешность определения координат в помещении типа "комната" при оценке только координат объекта:
 а — случай четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, а);
 б — случай восьми маяков

где $D_{v_x v_x}$ и $D_{v_y v_y}$ — соответствующие диагональные коэффициенты матрицы \mathbf{D} ; объект также движется по середине коридора. Величина $\sigma_{v_x v_y}$ принимает значения от 1 до 4 м/с.

На рис. 3, в показаны значения средней погрешности оценивания координат объекта σ_{xy} в статической задаче при нахождении объекта в коридоре. Видно, что при нахождении объекта "внутри" системы датчиков значение σ_{xy} составляет от 0,5 до 2 м, что, как и ожидалось, существенно лучше, чем в кинематической задаче (рис. 3, а).

На рис. 4 показаны вычисленные согласно (5) значения средней погрешности оценивания координат объекта σ_{xy} в кинематической задаче при нахождении (движении) объекта в комнате (см. рис. 2). При этом рис. 4, а соответствует конфигурации датчиков рис. 2, а, а рис. 4, б — конфигурации рис. 2, б. Величина σ_{xy} принимает значения от 1,9 до 2,5 м для случая четырех датчиков и от 0,9 до 1,2 м для случая с восемью датчиками.

Аналогичные данные приведены на рис. 5: показаны средние погрешности оценивания скоростей объекта $\sigma_{v_x v_y}$ в кинематической задаче. На рис. 6 показаны значения величины σ_{xy} в статической задаче. В последнем случае они примерно в два раза меньше, чем в кинематической задаче.

В целом ожидаемую погрешность оценивания координат следует признать приемлемой для большого числа практических приложений, погрешность же оценивания скорости (рис. 3, б и рис. 5) довольно велика.

Результаты натурального эксперимента

При проведении натуральных исследований использовали Bluetooth-маяки SKYLAB Beacon VG01 [24] и мобильный телефон Samsung Galaxy S8 на платформе Android. На рис. 7 показан результат оценки координат объекта в помещении типа "комната" при решении кинематической задачи. Точками показаны оценки местоположения объекта (100 точек — 100 последовательных решений задачи), при этом объект находился в середине комнаты (выколотый кружок). Рис. 7, а соответствует случаю четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, а), рис. 7, б — случаю восьми маяков (см. рис. 2, б).

На рис. 8 показан аналогичный результат оценки координат объекта при решении статической задачи.

Из результатов проведенных испытаний можно сделать вывод о том, что погрешность оценки координат объекта в натурном эксперименте

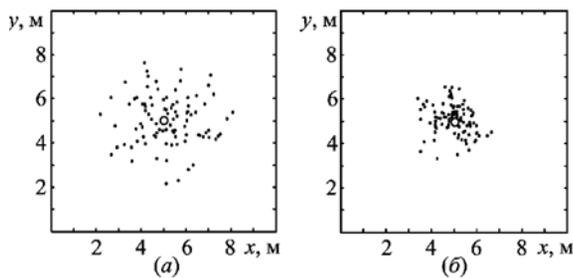


Рис. 7. Результаты оценки координат объекта в помещении типа "комната" при оценке координат и скоростей объекта:
a — случай четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, *a*);
б — случай восьми маяков

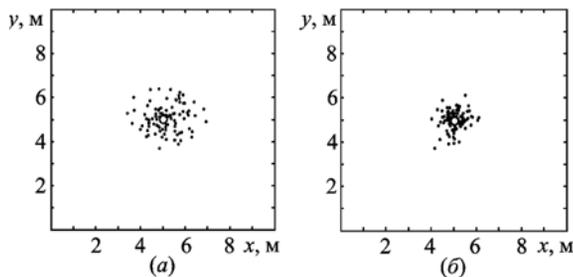


Рис. 8. Результаты оценки координат объекта в помещении типа "комната" при оценке только координат объекта:
a — случай четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, *a*);
б — случай восьми маяков

полностью соответствует предсказанной на основании расчетов. Для этого достаточно соотнести данные рис. 5 и 7 и рис. 6 и 8; видно, что погрешность оценки координат укладывается в круг с радиусом $2\sigma_{xy}$. Таким образом, теоретические данные о средней погрешности оценивания координат и скоростей объекта, полученные для линеаризованной задачи (из уравнения (5)), достаточно близки к реальным свойствам исходной задачи (1), (2), что подтверждает возможность их использования для анализа разрешимости при проектировании навигационной системы рассматриваемого типа.

Обсуждение

Данные расчетов и натуральных экспериментов показывают, что характер навигационных измерений, доступных для устройств типа Bluetooth, дает возможность качественного решения задачи наблюдения на характерных расстояниях "объект—датчик", не превышающих 5...7 м. При этом важны также условия наблюдения — взаимное расположение датчиков и объекта; наилучший результат обеспечивается в том случае, если датчики располагаются, как бы "окружая" объект.

Точность решения статической задачи существенно выше (примерно в 2 раза), чем кинематической. Вместе с тем игнорирование

в модели задачи скорости объекта при его реальном движении приводит к ее неудовлетворительному решению. Поэтому при разработке приложения, осуществляющего навигацию мобильного устройства, следует обязательно реализовать идентификацию модели движения. Для покоящихся на интервале наблюдения объектов нужно ограничиваться статической моделью задачи, а для движущихся использовать кинематическую модель. Создавая приложение, необходимо также учитывать ресурсоемкость операции чтения данных навигационных датчиков, при этом желательна, насколько это возможно, высокая частота обновления данных их внутреннего буфера.

Общей проблемой всех задач, решаемых методом линеаризации около опорного решения является локальность оценок их свойств. Проведенные натурные эксперименты показывают, что в рассматриваемой задаче свойства линеаризованной модели достаточно хорошо описывают исходную (нелинейную) задачу.

Построение навигационной системы рассматриваемого типа всегда связано с калибровкой датчиков и их привязкой к местной локальной системе координат (выставкой системы). Такая привязка может быть осуществлена различными известными способами, в том числе описанными в работах авторов, опубликованных ранее [25, 26].

Заключение

Результаты настоящего исследования позволяют оптимистично оценить возможность построения навигационной системы на основе Bluetooth-маяков с использованием классических модельных представлений маячных дальномерных систем. При характерном расстоянии 5 м между маяками и объектом реально достижимая точность определения координат объекта составляет 1...2 м, что достаточно для традиционных задач навигации внутри зданий (построение пути, контекстная реклама). Дальнейшее повышение точности навигации может быть связано с уменьшением случайной компоненты инструментальных ошибок измерений путем идентификации модели сигнала и применения различных алгоритмов фильтрации, чему авторы планируют посвятить отдельное исследование. Представляется, что улучшение точности навигации до значений порядка 0,5 м позволит качественно расширить возможный круг решаемых задач (навигация автономных робототехнических устройств, идентификация аномалий движения в потоке людей и т. п.).

Список литературы

1. **Шебшаевич В. С.** Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
2. **International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation.** URL: <http://ipin-conference.org/> (01.04.2018).
3. **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.
4. **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.
5. **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 радиорентриров // Гироскопия и навигация. 2017. № 1. С. 3–17.
6. **Щекотов М. С., Кашевник А. М.** Сравнительный анализ систем позиционирования смартфонов в помещениях // Труды СПИИРАН. 2012. № 4. С. 459–471.
7. **Namiot D.** On indoor positioning // International Journal of Open Information Technologies. 2015. N. 3. P. 23–26.
8. **Матвиенко Ю. В., Ваулин Ю. В., Каморный А. В.** Градуировка навигационных средств подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1. С. 16–22.
9. **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.
10. **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.
11. **Воронов Р. В., Мошевикин А. П.** Применение условной энтропии при формировании рекомендаций по размещению базовых станций в локальных системах позиционирования // Информационные технологии. 2014. № 10. С. 11–16.
12. **Мурашко И. А., Храбров Д. Е.** Методика локального позиционирования на основании Wi-Fi-сети университета // Весник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2: Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, Вылічальная тэхніка і кіраванне. 2015. № 2. С. 119–127.
13. **Воронов Р. В., Малодушев С. В.** Динамическое создание карт уровня Wi-Fi-сигналов для систем локального позиционирования // Системы и средства информатики. 2014. № 1. С. 80–92.
14. **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.
15. **Yang S. H., Jeong E. M., Kim D. R., Kim H. S., Son Y. H., Han S. K.** Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication // Electronics Letters. 2013. N. 49 (1). P. 54–56.
16. **Magnetic field anomalies.** URL: <http://www.gizmag.com/magnetic-anomaly-indoor-positioning/23253/> (01.04.2018).
17. **Петрова О. А., Табушник Г. В., Ван Мероде Д.** Метод определения текущего расположения в системах позиционирования и навигации внутри помещения // Электротехнические и компьютерные системы. 2017. № 25. С. 270–278.
18. **Овсянников А. А., Новиков П. А.** Модели реализации навигации внутри помещения при помощи анализа беспроводных источников данных // Компьютерные инструменты в образовании. 2015. № 4. С. 37–51.
19. **Retscher G.** Test and Integration of Location Sensors for a Multi-Sensor Personal Navigator // Journal of Navigation. 2007. Vol. 60, N. 1. P. 107–117.
20. **Протоколы. Bluetooth.** URL: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/Wireless/bluetooth/7.htm> (01.04.2018).
21. **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.
22. **Степанов О. А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2010. 509 с.
23. **Степанов О. А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 2. Введение в теорию фильтрации. СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2012. 417 с.
24. **Skylab.** Beacon virgo|beacon for indoor position. URL: <http://www.skylabmodule.com/beacon-virgo/> (01.04.2018).
25. **Grinyak V. M., Devyatisil'nyy 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. P. 124–130.
26. **Гриняк В. М., Гриняк Т. М., Иваненко Ю. С.** Динамическая выставка многопозиционной системы наблюдения // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. № 3. С. 12.

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

Vladivostok State University of Economics and Service,

A. S. Devyatisilny, Ph. D. (Tech.), Chief Researcher,

Institute of Automation and Control Processes, FEBRAS, Vladivostok, Russian Federation,

A. V. Shurygin, student,

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

Feasibility Study of Indoor Navigation with Bluetooth Beacons

The paper is devoted to research of possibility to use Bluetooth devices for indoors navigation. Relying on alternative measurements such as Wi-Fi network, onboard accelerometers, Bluetooth devices are vastly used to solve positioning and navigation problems when there are limitations to use global positioning satellite systems (such as GPS). Recently the indoors navigation became an important research problem with subset of developed math models and the implementation hardware. Even though there is a lot of interest in the solution of the problem, there are still no standard approach. Due to the accuracy limitations of the broadly available mobile devices applying inertial navigation approach would dramatically reduce variety of the hardware it could be used. Relying on available Wi-Fi networks for evaluation of navigation parameters also has accuracy limitations. However, using Bluetooth signal considered as way more prospective for solving navigation problems. Due to the small size, relatively low prices of Bluetooth transmitters and signal features (indoors walls and bulkheads are not transparent) it is possible to deploy special indoors infrastructure for navigation purposes. At this paper there is a common model definition for the object movement at the superposition field of set of "visible" Bluetooth transmitter signals. For solutions authors relay on linear approximation with applying Kalman's algorithm and least

squares method. The research includes numerical experiment results for defined set of physical parameters of the system such as an error of evaluation of signal level, signal sampling frequency typical for modern smartphones. There are results of 2D navigation modeling for 2 types of indoor geometry (big square room and long narrow corridor) with different configurations of navigation system (location of Bluetooth transmitters on the walls). The research covers 2 main problems: static and kinematic. Identified significant dependency from navigation network configuration on the accuracy of location and velocity evaluation. Numerical experiment shows that the evaluation error of kinematic problem is about twice bigger than it is for static problem. The paper also presents results of real experiments for static and kinematic problems with using SKYLAB Bacon VG01 Bluetooth transmitters and smartphone Samsung Galaxy S8. Real experiments confirmed that math model with linear approximation defined by authors is usable for solving indoors navigation problems using Bluetooth signal. The paper concludes that nature of the measurement available for Bluetooth signals is applicable for indoors accurate enough navigation for typical distances "object-beacon" in the range not more than 5-7 meters.

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

DOI: 10.17587/it.24.610-617

References

1. Shebshaevich V. S. *Setevye sputnikovye radionavigacionnyye sistemy* (Network satellite radio navigation systems), Moscow, Radio i svyaz', 1993, 408 p. (in Russian).
2. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, available at: <http://ipin-conference.org/> (01.04.2018).
3. 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, is.3, pp. 188–196 (in Russian).
4. Kronenwett N., Ruppelt J., Trommer G. F. Motion Monitoring based on a Finite State Machine for Precise Indoor Localization, *Gyroscopy and Navigation*, 2017, is.3, pp. 190–199.
5. 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, no. 1, pp. 3–17 (in Russian).
6. Shchekotov M., Kashevnik A. Comparative Analysis of Indoor Positioning Systems for Smartphones, *Proc. FRUCT Conf.*, 2012, pp. 43–48.
7. Namiot D. On indoor positioning, *International Journal of Open Information Technologies*, 2015, no. 3, pp. 23–26.
8. Matvienko Yu. V., Vaulin Yu. V., Kamornyy A. V. Graduirovka navigacionnyh sredstv podvodnyh robotov (Calibration for Underwater Robotic Vehicle's Navigation), *Podvodnye Issledovaniya i Robototehnika*, 2015, no. 1, pp. 16–22 (in Russian).
9. 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 Sistemy*, 2017, no. 12, pp. 11–14 (in Russian).
10. 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.
11. Voronov R. V., Moschevikin A. P. Primenenie uslovnoj jentropii pri formirovanii rekomendacij po razmeshheniju bazovyh stancij v lokal'nyh sistemah pozicionirovaniya (Use of Conditional Entropy for Optimal Disposition of Base Stations in Local Positioning Systems), *Information Technologies*, 2014, no. 10, pp. 11–16 (in Russian).
12. 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 dzjarzhaj'naga y'niversitjeta imja Janki Kupaly. Seryja 2: Matjematyka. Fizika. nfarmatyka, Vylichal'naja tjehnika i kiravanne*, 2015, no. 2, pp. 119–127 (in Russian).
13. Voronov R. V., Malodushev S. V. Dinamicheskoe sozdanie kart urovnja Wifi-signalov dlja sistem lokal'nogo pozicionirovaniya (Dynamic Creation Of Wi-Fi-Signal Level Maps For Location Systems), *Systems and Means of Informatics*, 2014, no.1, pp. 80–92 (in Russian).
14. Assur O. S., Filaretov G. F. Razrabotka kompleksnogo metoda pozicionirovaniya ob#ektov po dannyh besprovodnyh setej Wi-Fi i ustrojstv BLE (Bluetooth Low Energy), *Izvestija Instituta Inzhenernoj Fiziki*, 2015, no. 2, pp. 2–10 (in Russian).
15. Yang S. H., Jeong E. M., Kim D. R., Kim H. S., Son Y. H., Han S. K. Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication, *Electronics Letters*, 2013, no. 49 (1), pp. 54–56.
16. Magnetic field anomalies, available at: <http://www.gizmag.com/magnetic-anomaly-indoor-positioning/23253/> (date of access 01.04.2018).
17. Petrova O., Tabunshchik G., Van Merode D. Metod opredelenija tekushhego raspolozhenija v sistemah pozicionirovaniya i navigacii vnutri pomeshhenija (Method for Location Detection in Indoor Navigation Systems), *Jelektrotehničeskije i Komp'juternye Sistemy*, 2017, no. 25, pp. 270–278 (in Russian).
18. Ovsyannikov A. A., Novikov P. A. Modeli realizacii navigacii vnutri pomeshhenija pri pomoshhi analiza besprovodnyh istočnikov dannyh (Implementation of the indoor navigation algorithm based on Bluetooth Low Energy 4.0. technology), *Komp'juternye Instrumenty v Obrazovanii*, 2015, no. 4, pp. 37–51 (in Russian).
19. Retscher G. Test and Integration of Location Sensors for a Multi-Sensor Personal Navigator, *Journal of Navigation*, 2007, vol. 60, no.1, pp. 107–117.
20. Bluetooth, available at: <http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/doc/Wireless/bluetooth/7.htm> (date of access 01.04.2018).
21. 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, p. 763–764.
22. Stepanov O. A. Osnovy teorii ocenivaniya s prilozhenijami k zadacham obrabotki navigacionnoj informacii. Chast' 1. Vvedenie v teoriju ocenivaniya (Fundamentals of the theory of estimation with applications to the tasks of processing navigation information. Part 1. Introduction to the theory of estimation), SPb., GNC RF OAO "Koncern "CNII "Jelektropribor", 2010, 509 p. (in Russian).
23. Stepanov O. A. Osnovy teorii ocenivaniya s prilozhenijami k zadacham obrabotki navigacionnoj informacii. Chast' 2. Vvedenie v teoriju fil'tracii (Fundamentals of the theory of estimation with applications to the tasks of processing navigation information. Part 2. Introduction to the theory of filtration), SPb., GNC RF OAO "Koncern "CNII "Jelektropribor", 2012, 417 p. (in Russian).
24. Skylab Beacon virgo|beacon for indoor position, available at: <http://www.skylabmodule.com/beacon-virgo/> (date of access 01.04.2018).
25. Grinyak V. M., Devyatil'snyj 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 (in Russian).
26. Grinyak V. M., Grynyak T. M., Ivanenko Y. Dinamicheskaja vystavka mnogopozicionnoj sistemy nabljudenija (Dynamic Adjustment of Multiposition Observing System), *Modelirovanie, Optimizacija i Informacionnye Tehnologii*, 2017, no. 3, pp. 12.