ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ РАДИОКАРТ И ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Киреев¹* Г.А. Фокин¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация *Адрес для переписки: kireyev@list.ru

Информация о статье

УДК 621.396 Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Киреев А.В., Фокин Г.А. Оценка точности локального позиционирования мобильных устройств с помощью радиокарт и инерциальной навигационной системы // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 4. С. 54–62.

Аннотация: Предложен метод построения радиокарт уровней принимаемых сигналов Wi-Fi и сигналов инерциальной навигации от встроенных датчиков микроэлектромеханических устройств, на его основе выполнена экспериментальная оценка точности позиционирования мобильного устройства внутри помещения с использованием радиокарт уровней принимаемых уровней и встроенных систем инерциальной навигации. Эксперимент проводился в развернутой сети Wi-Fi СПбГУТ и показал возможность повышения точности позиционирования на 15 % при комплексировании сигналов Wi-Fi и инерциальной навигации по сравнению с известным методом радиокарты.

Ключевые слова: позиционирование, источник радиоизлучения, метод радиокарты, инерциальная навигационная система.

Введение

Внутри помещений сигналы глобальных навигационных спутниковых систем, как правило, недоступны, поэтому определение местоположения подвижных объектов осуществляется системами локального позиционирования. Востребованность систем локального позиционирования обусловлена широким спектром геоинформационных услуг и приложений обеспечения безопасности внутри помещений различного назначения, например, в торговых центрах, промышленных предприятиях, аэропортах, железнодорожных вокзалах, музеях и выставках, спортивных площадках, стадионах, офисах, складах, метро, университетах, школах и т.д. Высокой точностью позиционирования внутри помещений (порядка 1 м) обладают системы класса nanoLOC [1], определенные стандартом IEEE 802.15.4а и функционирующие на основе времени распространения сигнала, однако они не развернуты повсеместно, как сети Wi-Fi, а также не интегрированы в массовые абонентские устройства смартфоны.

Современные смартфоны оснащены чипами с микроэлектромеханическими системами (МЭМС), объединяющими в себе гироскоп и акселерометр, которые также используются как средство для реализации инерциальной навигационной системы (ИНС) для ориентации пользователя. Известно, что совместное использование методов позиционирования на базе сети Wi-Fi и инерциальной навигации позволяет скомпенсировать ошибки отдельных систем и увеличить совокупную точность. В настоящей статье предлагается метод построения радиокарты на базе развернутой сети Wi-Fi с одновременным использованием ИНС для позиционирования объекта внутри помещения.

Суть предлагаемого метода заключается в одновременной обработке измерений инерциальной навигации и радиокарт уровней сигналов на основе фильтра Калмана. Радиокарты уровней сигналов строятся в режиме реального времени на основе подхода SLAM (одновременная локализация и построение карты) по принимаемым мобильным устройством сигналам *RSSI (от англ.* Received Signal Strength Indication) маяков от точек доступа беспроводных локальных сетей Wi-Fi. Измерения инерциальной навигационной системы поступают от встроенных в мобильное устройство МЭМС-датчиков, образующих инерциальный модуль определения траектории IMU. Повышение точности позиционирования достигается за счет комплексирования измерений инерциальной навигации и радиокарт уровней принимаемых сигналов Wi-Fi. В статье представлены принципы работы методов радиокарт и ИНС, функциональная схема предложенного метода одновременной обработки измерений, а также экспериментальные результаты позиционирования по ИНС, *RSSI* и с помощью фильтра Калмана.

Принцип работы метода радиокарты

Для экспериментальной реализации позиционирования на базе сети Wi-Fi требуется рассмотреть принцип работы метода радиокарты. Метод радиокарты основан на измерении уровней *RSSI* в определенном наборе опорных точек с известными координатами. Получаемая база данных и называется радиокартой. Местоположение объекта определяется путем сравнения уровней от измеряемого объекта с набором данных из радиокарты и используется в методе ближайших соседей. Метод ближайших соседей состоит из двух фаз: построения радиокарты и сравнения с данными из базы для нахождения совпадения.

Первая фаза (процесс построения радиокарты) включает в себя, во-первых, определение территории позиционирования и, во-вторых, разметку территории на сетку из одинаковых секторов (обычно 1м × 1м). Каждая ячейка сетки представляет собой опорный пункт для измерений *RSSI*. Затем делаются соответствующие замеры уровней *RSSI* в каждом опорном пункте. Каждому опорному пункту измерений соответствует вектор измерений *RSSI* $R = r_1, r_2 ... r_N$, где N – количество точек доступа. Учет направления движения улучшает точность позиционирования, поэтому для каждого опорного пункта выполняется 4 измерения.

В таблице 1 приведена структура радиокарты с учетом направления движения, где: *RSSI_{MN}* – уровень принимаемого сигнала; *М* – индекс опорного пункта.

№ опорного пункта	Точка доступа 1	Точка доступа 2	 Точка доступа N
1	RSSI _{11-0°} RSSI _{11-90°} RSSI _{11-180°} RSSI _{11-270°}	RSSI _{12-0°} RSSI _{12-90°} RSSI _{12-180°} RSSI _{12-270°}	 RSSI _{1N-0°} RSSI _{1N-90°} RSSI _{1N-180°} RSSI _{1N-270}
2	RSSI _{21-0°} RSSI _{21-90°} RSSI _{21-180°} RSSI _{21-270°}	RSSI22-0° RSSI22-90° RSSI22-180° RSSI22-270°	 RSSI _{2N-0°} RSSI _{2N-90°} RSSI _{2N-180°} RSSI _{2N-270°}
М	RSSI _{M1-0°} RSSI _{M1-90°} RSSI _{M1-180°} RSSI _{M1-270°}	RSSI _{M2-0°} RSSI _{M2-90°} RSSI _{M2-180°} RSSI _{M2-270°}	 RSSI _{MN-0°} RSSI _{MN-90°} RSSI _{MN-180°} RSSI _{MN-270°}

Вторая фаза (определение местоположения) предполагает сравнение вектора измерений от

абонентского устройства с векторами из радиокарты. Примем, что вектор измерений от абонентского устройства $S(RSSI_1, RSSI_2 \dots RSSI_N)$ сравнивается с векторами из радиокарты. Для того чтобы найти лучшее совпадение используется Эвклидова метрика (*om англ.* Euclidean distance):

$$ED = \min dis(S, R), dis(S, R) =$$

$$= \sqrt{\sum_{n=1}^{N} (RSSI_N(x, y) - RSSI_N(x_i, y_i))^2}, \qquad (1)$$

где (x, y) – известные координаты опорного пункта, (x_i, y_i) – искомые координаты пользователя.

=

Основными недостатками метода радиокарты является высокая трудоемкость, связанная с необходимостью большого количества предварительных измерений для конфигурации базы данных уровней принимаемых сигналов RSSI, а также необходимость постоянной реконфигурации базы данных, обусловленной изменениями условий распространения радиоволн внутри помещения, например, добавление/удаление точек доступа, препятствий. В предлагаемом далее методе одновременной обработки инерциальной навигационной системы и RSSI не требуется проводить большого количества первичных измерений, так как ИНС оперирует с мгновенными значениями направления движения и не требует предварительной подготовки. Принцип действия ИНС будет рассмотрен далее.

Принцип работы инерциальной навигационной системы

Инерциальная навигационная система – это комплекс микро-электромеханических устройств, который обеспечивает определение скорости и угла поворота объекта [2]. Движение абонентского устройства отслеживается с помощью 6 параметров, определяемых акселерометром и гироскопом. Акселерометр обеспечивает определение линейного ускорения, гироскоп – азимутального угла в декартовых координатах. Система координат в привязке к смартфону показана на рисунке 1.



Рис. 1. Система координат в привязке к корпусу смартфона

Важным источником ошибок акселерометра является накапливающееся смещение (дрейф) ε . Смещение акселерометра в отсутствие ускорения при двойном интегрировании вызывает ошибку скорости $\alpha(t)$, пропорциональную времени интегрирования, и ошибку в вычисленном положении, растущую квадратично [3]:

$$\alpha(t) = \varepsilon * \frac{t^2}{2},\tag{2}$$

где *t* – время интегрирования.

Постоянное смещение гироскопа определяет ошибку подсчета угловой скорости $\theta(t)$, растущую линейно:

$$\theta(t) = \varepsilon * t, \tag{3}$$

Математическое интегрирование a(t) позволяет подсчитать скорость v(t), двойное интегрирование определит пройденное расстояние:

$$v(t) = v(0) + \int_0^t a(t)dt,$$
 (4)

$$s(t) = s(0) + \int_0^t v(t)dt.$$
 (5)

Для компенсации смещений акселерометра и гироскопа в данном исследовании используется алгоритм детектирования шагов пользователя. Алгоритм основан на определении длины шага и подсчете их количества:

$$X_k = X_{k-1} + S_k,$$
 (6)

где:

X_k, X_{k-1} – векторы положения после и до *k*-того шага пользователя;

S_k – вектор положения для *k*-того шага:

$$S_k = [l_k \cos\theta_k, l_k \sin\theta_k]^T, \tag{7}$$

где *l* и *θ* длина и угол ориентации для *k*-того шага пользователя соответственно.

Так как длина шага изменяется (не постоянна), было решено использовать модель динамического изменения длины шага [4]:

$$l_k \approx \sqrt[4]{a_{max} - a_{min}} * K, \tag{8}$$

где (на одном шаге):

а_{max} – максимальное значение ускорения; а_{min} – минимальное значение ускорения;

К – константа, определяемая в ходе эксперимента.

Полное ускорение определяется выражением:

$$a_{\Sigma} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2},\tag{9}$$

где a_x, a_y, a_z – соответствующие значения ускорений по координатам *x*, *y*, *z*, от акселерометра.

Совместное использование вышеобозначенных алгоритмов радиокарты и ИНС реализовано в предложенном методе позиционирования внутри помещения. Далее приведено описание, принцип работы и функциональная схема метода одновременной обработки измерений ИНС и *RSSI*.

Принцип работы метода одновременной обработки ИНС и *RSSI*

На рисунке 2 представлена функциональная схема позиционирования объекта с одновременным использованием данных от инерциальной навигационной системы и *RSSI*.



Рис. 2. Функциональная схема позиционирования (по ИНС и *RSSI*)

На первом этапе при сборе первичных данных формируется база данных радиокарты. Данные ИНС, аналогично данным RSSI, собираются в таблицу первичных измерений. Кроме того, в процессе фиксируются временные отсчеты для правильного формирования набора данных для каждой фиксированной точки. Данные RSSI содержат MAC-адреса, уровни сигналов и отсчеты счетчика времени. Информация от ИНС содержит значения ускорения, угловой скорости, азимутальный угол и также временные отрезки. Результатом первого этапа является база радиокарты, содержащая наборы измерений по инерциальной навигационной системе и RSSI для соответствующих координат. На втором этапе данные наборы сопоставляются с измеренными значениями от мобильного устройства и выбираются подходящих координат по методу ближайших соседей в соответствии с выражением (1). Данные по инерциальной навигационной системе обрабатываются с помощью выражения (6) для определения длины шага. Промежуточные результаты оценки координат каждым из подходов в отдельности комплексируются фильтром Калмана для увеличения точности позиционирования и компенсации случайных выбросов.

Схема, представленная на рисунке 2, программно реализована в среде Matlab, и функционирует в реальном времени, что предоставило возможность экспериментально проверить работу метода одновременной обработки измерений ИНС и *RSSI*.

Результаты эксперимента

Эксперимент по локальному позиционированию мобильного объекта был проведен на базе сети Wi-Fi Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Позиционирование объекта осуществлялось на одном этаже площадью около 400 м². В качестве мобильного устройства был использован Iphone 6, оснащенный шестиосным чипом для инерциальной навигации InvenSense MP67B [5], позволяющим получать данные от гироскопа и акселерометра с точностью до третьего знака. Работа непосредственно с датчиками потребовала освоения интерфейса прикладного программирования, поставляемого производителем. Чип также оснащен магнитометром и приемником GPS, но в данной работе они задействованы не были.

Информация от *RSSI* и инерциального датчика собиралась с помощью мобильного приложения Matlab mobile [6]. Мобильное приложение Matlab mobile позволяет собирать первичные данные как со всех сенсоров (акселерометра и гироскопа) сразу (рисунок 3), так и с каждого в отдельности, а также мгновенно формировать графики траектории движения пользователя. Таким образом, реализован построение радиокарт уровней в реальном времени на основе подхода SLAM.

K More	Sensors	START SENDING	
AC	*	V ()	
Acceleration			
X m/s ^²		0.724	
Y m/s ²		5.524	
Z m/s		7.972	
C Magnetic Fiel	d		
Χ μτ		-4.634	
Υ μτ		-25.892	
Z µT		-20.674	
· Orientation			
Azimuth degrees		155.204	
Pitch		-36.101	
Communico Elas	() History	102 ····	

Рис. 3. Интерфейс приложения Matlab mobile

Также необходимо отметить, что данные от ИНС поступают с большей частотой в отличие от *RSSI*, таким образом массивы от указанных двух источников имеют разную размерность, что осложнило реализацию формирования наборов измерений для базы радиокарты. Данная проблема была решена за счет использования временных отсчетов, то есть была введена фаза калибровки для сопоставления значений *RSSI* и ИНС.

Из-за ограничений мобильного устройства [7], в частности скорости работы процессора, обработка измерений осуществлялась на ноутбуке. Эксперимент проводился по следующей схеме: мобильное устройство было подключено по беспроводной сети Wi-Fi к ноутбуку, массив первичных измерений по команде транслировался в реальном времени в оперативную память ноутбука [8]. По окончании формирования массива первичных измерения на ноутбуке автоматически исполняется программа по обработке и реализации методов позиционирования. Необходимость формирования массивов первичных данных потребовало разработки программного обеспечения (фрагмент на рисунке 4) для Matlab mobile, позволяющего передавать и сохранять накопленные измерения в ПЗУ ноутбука.

ev1	Documents MATLAB accel_log_MAC.r				
1	format long				
2	[o t ol =orientlog(m);				
2	$[a, t_a] = accellog(m);$				
A	$[a, c_a] = accer(og(m)),$				
4	[av, t_av]=angvettog(m),				
6	mkdir(//licers(artkireev1/				
0	Deskton/INS/INSS')%change folder				
	name				
7	hhl-fonen('/llcors/artkireev1/				
-1	Deskton/INS/INSS/				
	Acc log+time csv' 'w')				
8	hh2=fonen('/lisers/artkireev1/				
0	Deskton/INS/INS5/				
	Orient log+time csv', 'w'):				
9	hh3=fopen('/Users/artkireev1/				
-	Desktop/INS/INS5/				
	Anavel log+time.csv'.'w'):				
10	hh4=fopen('/Users/artkireev1/				
	Desktop/INS/INS5/				
	ME loo+time.csv'.'w'):				
11	<pre>for n1=1:length(a)</pre>				
12	ii1=[a(n1.:) t a(n1.:)]:				
13	fprintf(hh1,'%s %s %s				
	%s\n'.jjl):				
14	end				
15	for $n^2=1$:length(n)				

Рис. 4. Программа формирования массивов измерений

Для определения координат и обработки данных использовалось собственное программное обеспечение, разработанное для исполнения в среде Matlab, реализующее порядок действий функциональной схемы (см. рисунок 2). Для лучшей визуализации результатов реализована автоматизированная отрисовка траектории движения на карте этажа с сохранением всех необходимых пропорций.

Таким образом, результаты эксперимента показаны посредством графиков зависимости (гистограмм) количества измерений, содержащих ошибки от величины ошибок в метрах, а также с помощью сравнения базовой и сформированных траекторий движения на плане этажа. Точность позиционирования определялась значением среднеквадратичной ошибки, как наиболее распространенным показателем при необходимости подобных оценок:

$$\Delta = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \sqrt{(x_{\text{onp}} - x_{\text{pean}})^2 + (y_{\text{onp}} - y_{\text{pean}})^2}, \quad (10)$$

где $x_{\text{опр}}$, $y_{\text{опр}}$ – координаты местоположения, определенные в ходе эксперимента; $x_{\text{реал}}$, $y_{\text{реал}}$ – реальные координаты мобильного устройства; L – число измерений.

Измерения проводились в следующем порядке:

- позиционирование по ИНС;
- позиционирование по RSSI;

 позиционирование предложенным методом с использованием фильтра Калмана.

Реальная (базовая) траектория движения мобильного устройства и траектория, построенная по инерциальной навигационной системе представлены на рисунке 5. Базовая траектория выбиралась таким образом, чтобы проанализировать точность реализованных методов на большом расстоянии, а также при сложных поворотах пользователя. Действительная длина траектории составила 175 м.

Для построения траектории по ИНС использовались значения линейного ускорения, получаемые от акселерометра, и азимутального угла поворота, определяемого гироскопом.



Рис. 5. Позиционирование объекта по ИНС

Длина пути пользователя, построенная с помощью инерциальной навигационной системы, составила 172,5 м. Разница в 2,5 м вызвана неточностью определения длины шага (8). Ошибка измерения длины шага может быть снижена при использовании более сложного алгоритма динамического обнуления нулевой скорости [9], однако он требует предварительной подготовки и накапливания статистики [10], что не отвечает задачи снижения временных затрат по организации системы позиционирования внутри помещений.

Анализируя полученную форму траектории необходимо отметить, что по ходу движения ошибка увеличивается, и линия движения пересекает стены помещений при поворотах, что неприемлемо для позиционирования внутри помещений. Особенно это заметно так как траектории в начале отслеживания совпадают, а ближе к концу расходятся, и заканчиваются в разных точках. Это явление объясняется вышеуказанным накапливающимся смещением (2), которое вызывает дрейф нуля гироскопа и акселерометра. Также в процессе проведения эксперимента было отмечено, что чем больше скорость движения пользователя, тем быстрее растет ошибка как указано в (3).

При проведении эксперимента горизонтальное положение мобильного устройства было фиксировано для корректного отображения азимута. Подобный сценарий неприменим в условиях обычного использования мобильного устройства. Тем не менее, данный способ позиционирования может быть использован для составления базы радиокарты, так позволяет и снизить ресурсоемкость первой фазы обучения радиокарты. Далее проанализируем гистограмму зависимости количества ошибочных измерений от величины ошибки по ИНС (рисунок 6).



Рис. 6. График распределения ошибок ИНС

Наибольшее количество ошибочных измерений сосредоточено в пределах 1,5-2 метров. Значительное количество измерений с минимальными ошибками (в начале координат) объясняется начальным этапом движения пользователя, пока дрифт гироскопа и акселерометра минимален. Стабилизация ошибки в пределах 2-х метров обусловлена реализованным алгоритмом определения длины шага (8), а также допущенным упрощением условий эксперимента по фиксации положения мобильного устройства в горизонтальной плоскости.

Эксперимент по позиционированию объекта по RSSI проводился в аналогичных ИНС условиях. Измерения проводились без предварительного определения координат точек доступа сетевой инфраструктуры. Всего было продетектировано 127 точек доступа. Развитая беспроводная сеть с одной стороны позволяет значительно улучшить точность определения координат, с другой стороны значительное количество слабых сигналов обуславливает необходимость фильтрации. Так как частота измерения уровней сигналов слишком мала, в случае для движущегося объекта построить полноценную траекторию не удалось, поэтому на рисунке 7 представлены реальная траектория движения, а также отдельные точки предполагаемого местоположения пользователя, вычисленные по методу ближайших соседей.



Рис. 7. Позиционирование объекта по RSSI

Проблему недостаточной частоты измерений уровней сигналов возможно решить с помощью построения модели распространения сигнала [11], однако ее реализация требует значительного количества предварительных измерений.

Реализация калибровки по времени позволяет сравнить соответствующие координаты на базовой траектории и полученные методом *RSSI* координаты. Необходимо отметить, что значительное

количество точек находится за пределами стен коридора, что обусловлено малым количеством точек доступа в этих областях. Более того, координаты по *RSSI* не позволяют оценить местоположение пользователя при поворотах. Таким образом, использование уровней точек доступа не может быть применимо для движущегося объекта.

Совместное использование ИНС и *RSSI* позволит уменьшить влияние малого количества точек до-

ступа в определенных областях и спрогнозировать траекторию движения пользователя при поворотах за счет азимутального угла.

Далее проанализируем гистограмму зависимости количества ошибочных измерений от величины ошибки по *RSSI* (рисунок 8).



Рис. 8. График распределения ошибок RSSI

Пиковое количество ошибочных измерений сосредоточено в пределах 1 метра. В сравнении с ИНС точность вычисления выше, так как отсутствует смещение нуля акселерометра и гироскопа.

Невозможность определения траектории движущегося объекта по *RSSI* является неприемлемым фактором для позиционирования внутри помещения, однако метод может быть использован для формирования базы данных радиокарты.

Далее рассмотрим результаты эксперимента по позиционированию предложенным методом с использованием фильтра Калмана. Для увеличения точности позиционирования координаты соответствующих точек на траектории попадают на вход фильтра Калмана [12, 13], что позволяет построить полноценную траекторию движения объекта независимо от скорости и количества точек доступа.

Анализ графика распределения ошибок при фильтрации (рисунок 9) показывает, что пиковое количество ошибок находится в пределах 0,75 метров, что в сравнении с позиционированием по RSSI является лучшим результатом. Реализация более сложного фильтра Калмана [14, 15] позволит незначительно увеличить точность, но потребует большей вычислительной мощности, а также внедрения методик машинного обучения.



Рис. 9. График распределения ошибок при фильтрации

При анализе сформированной траектории передвижения (рисунок 10) необходимо отметить, что в некоторых случаях имеет место пересечение стен, что неприемлемо для позиционирования внутри помещений.



Рис. 10. Позиционирование объекта с использованием фильтра Калмана

Тем не менее, траектория, спрогнозированная предложенным методом совместного позиционирования *RSSI* и ИНС, дает возможность однозначно определить путь следования пользователя даже при резком изменении направления движения.

Номер теста п/п	СКО ИНС, м	СКО <i>RSSI,</i> м	СКО Фильтр Калмана, м				
1-10	0,73	1,06	0,80				
10-20	0,79	0,97	0,78				
20-30	0,79	1,03	0,87				
30-40	1,87	0,91	0,70				
40-50	1,78	0,90	0,69				
50-60	1,73	1,00	0,97				
60-70	1,1	0,91	0,85				
70-80	2,87	1,01	0,86				
Среднее значение	2,07	0,97	0,81				

ТАБЛИЦА 2. Результаты позиционирования по ИНС, *RSSI* и фильтру Калмана

Итоговые результаты позиционирования по всем трем методам приведены в таблице 2. Всего было проведено порядка 80 измерений в реальных условиях. В таблице сформированы усредненные СКО последовательно по 10 измерениям.

Точность инерциальной навигационной системы составила 2,07 м. Такая погрешностью для позиционирования внутри помещений чрезмерно велика. Тем не менее, информация о направлении и скорость движения пользователя позволяет формировать траекторию его движения с большей достоверностью.

Точность позиционирования *RSSI* составила 0,97 м, что является неплохим результатом внутри помещений, в то же время в случае движущегося объекта однозначно определить местоположение невозможно.

Точность позиционирования метода одновременной обработки ИНС и *RSSI* с применением фильтра Калмана составила 0,81 м. Таким образом, точность позиционирования увеличилась на 15 % по сравнению с применением метода *RSSI*. В то же время применение фильтра Калмана позволило предсказать траекторию движущегося объекта.

Заключение

Полученные результаты эксперимента по разработке метода одновременного использования ИНС и *RSSI* подтверждают правомерность данного подхода к решению проблемы позиционирования подвижных объектов внутри помещения.

Анализ результатов позиционирования по инерциальной навигационной системе (точность составляет около 2 м) позволяет сделать вывод о том, что отдельное применение ИНС для локализации пользователя невозможно, так как требует идеальных начальных условий (фиксирования положения датчика). Вместе с тем, инерциальная навигационная система применима для формирования базы радиокарты.

Экспериментальная проверка метода позиционирования пользователя по *RSSI* выявила нецелесообразность его использования для движущегося объекта, так как частота регистрации значений слишком мала. В свою очередь применение ИНС позволяет нивелировать этот недостаток.

Одновременное использование обоих методов увеличило точность позиционирования на 15 %, при этом применение фильтра Калмана дает возможность определить траекторию движения пользователя с большей точностью. Кроме того, в данном случае сбор первичных данных не требует значительных временных затрат в отличие от классического метода составления радиокарты.

Дальнейшие исследования полагается связать с реализацией и моделированием более совершенного фильтра Калмана [16, 17], для обеспечения возможности распознавания границ и объектов на карте. Также целесообразно проанализировать результаты статистически с помощью границы Крамера-Рао [18].

Благодарности

Выражаем благодарность за помощь в разработке программного обеспечения и проведении эксперимента нашему коллеге – Дмитриеву П.Д., аспиранту Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Список используемых источников

1. Sivers M., Fokin G., Dmitriev P., Kireev A. Indoor Positioning in WiFi and NanoLOC Networks // Lecture Notes. Comp. Sciences. 2016. Vol. 9870. PP. 465–476.

2. Woodman O.J. An Introduction to Inertial Navigation. Rep. Nº UCAM-CL-TR-696. University of Cambridge. Computer Laboratory. 2007.

3. Jimenez A.R., Seco F., Prieto C., Guevara J. A Comparison of Pedestrian Dead-Reckoning Algorithms Using a Low-Cost MEMS IMU. Intelligent Signal Processing. IEEE. 2009. PP. 37–42.

4. Marquardt, D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // SIAM Journal Applied Math. 1963 Vol. 11. PP. 431–441.

5. InvenSense's 6-axis Family of Motion Sensors. URL: https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/

6. Matlab mobile. URL: https://www.mathworks.com/products/matlab-mobile.html

7. MATLAB Support Package for Apple iOS Sensors. URL: https://www.mathworks.com/videos/matlab-mobile-overview

8. Gonzalez R., Mahulea C., Kloetzer M. A Matlab-based Interactive Simulator for Teaching Mobile Robotics // Proc. IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering. 2015. PP. 310–315.

9. Zhongyu G., et al. A Comparison of ZUPT Estimation Methods for Inertial Survey Systems // Journal of Chinese Inertial Technology. 1995. Vol. 2. PP. 24–29.

10. Liu Y., et al. Step Length Estimation Based on D-ZUPT for Pedestrian Dead-Reckoning System // Electronics Letters. 2016. Vol. 52. Iss. 11. PP. 923–924.

11. Julier S.J., Uhlmann J.K. A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems // Proc. Int. Symp. Aero-space/Defense Sensing, Simul. and Controls. 1997. Vol. 3. Iss. PP. 182–193.

12. Grewal M.S. Kalman filtering. International Encyclopedia of Statistical Science. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. PP. 705–708.

13. Haykin S.S., et al. Kalman Filtering and Neural Networks. New York: Wiley, 2001. P. 304.

14. Ahmadi H., Bouallegue R. Exploiting Machine Learning Strategies and RSSI for Localization in Wireless Sensor Networks: A Survey // Proc. 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). 2017. PP. 1150–1154.

15. Sivers M., Fokin G., Dmitriev P., Kireev A. Wi-Fi Based Indoor Positioning System Using Inertial Measurements // Lecture Notes. Comp. Sciences. 2017. Vol. 10531. PP. 734–744.

16. Krakiwsky E.J., Harris C.B., Wong R.V.C. A Kalman Filter for Integrating Dead Reckoning, Map Matching and GPS Positioning // Proc. Position Location and Navigation Symposium. Record. Navigation into the 21st Century (PLANS'88). 1988. PP. 9–46.

17. Song Y., Grizzle J.W. The Extended Kalman Filter as a Local Asymptotic Observer for Nonlinear Discrete-Time Systems // Proc. American Control Conference. 1992. PP. 3365–3369.

18. Киреев А.В., Федоренко И.В., Фокин Г.А. Оценка точности позиционирования объекта с помощью границы Крамера-Рао // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. З. №. 2. С. 77–83.

* * *

ACCURACY EVALUATION OF LOCAL POSITIONING BY RADIOMAP BUILDING AND INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

A.V. Kireev^{1*}, G.A. Fokin¹

¹The Bonch-Bruevich State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info:

Article in Russian

For citation: Kireev A.V., Fokin G.A. Accuracy Evaluation of Local Positioning by Radiomap Building and Inertial Navigation System // Proceedings of Telecommunication Universities. 2017. Vol. 3. Iss. 4. PP. 54–62.

Annotation: Article is devoted to the proposed method for constructing radiomaps of received Wi-Fi signal levels and inertial navigation signals from the built-in sensors of microelectromechanical devices. Experimental estimation of the positioning accuracy of the mobile device indoors using radio levels of the received levels and built-in inertial navigation systems is performed. The experiment was conducted in the expanded Wi-Fi network of SPbGUT and showed the possibility of increasing the positioning accuracy by 15 % in case of combining Wi-Fi signal and inertial navigation in comparison with the known method of radiomap building.

Keywords: positioning, simulation modelling, radiomap, inertial navigation system.