

ИНТЕГРАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЯ

С.Ю. Агафонов^{1*}, М.А. Сиверс¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: agich_9@mail.ru

Информация о статье

УДК 621.396

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Агафонов С.Ю., Сиверс М.А. Интеграция спутниковых радионавигационных систем и систем позиционирования внутри помещения // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 36–42. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-2-36-42

Аннотация: В настоящей статье показывается актуальность задачи расширения зоны представления услуги локализации мобильного объекта с использованием беспроводных технологий, а также повышения точности пространственной локализации. В интересах решения данной задачи разработан новый алгоритм комплексирования данных, характеризующих местоположение мобильного объекта, при осуществлении интеграции нескольких беспроводных систем, которые предоставляют возможность локализации мобильного объекта, как на открытом пространстве, так и внутри помещения. Для проверки алгоритма разработан прототип гибридной системы позиционирования мобильного объекта. Применение описываемого в статье алгоритма комплексирования данных от разных систем позиционирования позволяет не только решить задачу определения локации мобильного объекта в области перехода с открытого пространства внутрь помещения, но и повысить точность определения его истинного местоположения.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, точность позиционирования, ошибка локализации, комплексирование данных, навигационные системы, GNSS, IEEE 802.15.4a.

Введение

На современном этапе развития беспроводных сетей, а также степени их использования, как в повседневной жизни, так и на промышленных предприятиях, особую актуальность приобретают вопросы пространственной локализации мобильных объектов не только на открытом пространстве, но и внутри помещений, которые также неразрывно связаны с необходимостью контроля за местоположением как промышленных ресурсов, так и персонала, в том числе лиц, не являющихся сотрудниками предприятия. Повышение требований и запросов потребителей заставляет искать способы повышения качества предоставляемых услуг, что в приложении к вопросам пространственной локализации сводится к задаче расширения ее зоны и повышения точности выдаваемых значений, характеризующих местоположение мобильного объекта (далее – МОб). В отличие от существующих решений для позиционирования на основе отдельных радиотехнологий, призванных

решать задачу локализации МОб только в одной конкретной области пространства, предлагается комплексное решение, позволяющее выдавать данные о местоположении МОб без перерывов, в том числе внутри помещения. Объединение данных от различных беспроводных технологий гипотетически позволит наиболее полно составить картину о траектории движения и произвести выбор предпочтительного канала получения достоверной информации о местоположении МОб. Однако все это возможно лишь при наличии соответствующих моделей и методов, позволяющих объединять (комплексировать) данные от нескольких беспроводных технологий, а также при описании конкретных способов повышения точностных характеристик системы позиционирования. Для решения указанной научной задачи авторами был разработан алгоритм комплексирования данных, характеризующих местоположение МОб, при осуществлении интеграции нескольких беспроводных систем, предоставляющих возможность локализации МОб.

Алгоритм комплексирования результатов локализации от двух систем позиционирования

Для совместной обработки результатов позиционирования по измерениям приемников системы глобальной спутниковой навигации (GNSS, от англ. Global Navigation Satellite System) и измерениям в сети, основанной на технологии стандарта IEEE 802.15.4a, позволяющих осуществлять локализацию МОб, разработан новый алгоритм комплексирования данных, характеризующих местоположение МОб, в основе которого лежит запоминание и совместная обработка полной выборки разновременных измерений по перечисленным системам позиционирования и рекуррентные методы обработки информации по нарастающему объему измерений. Для этого получены оценки элементов вектора состояния по проведенным измерениям при принятых моделях динамики изменения вектора состояния и шумов измерений. Для построения алгоритма комплексирования, выполняющего функцию дополнительной обработки данных об измерениях, было необходимо определить векторы состояния и измерений, а также обосновать модели шумов измерений и возмущений и их переходные матрицы. Несмотря на то, что понятие обработки охватывает достаточно широкий спектр манипуляций, в контексте решаемой задачи понятие обработка сводится к комплексированию данных, то есть их объединению, а алгоритм комплексирования будет именоваться алгоритмом фильтра интеграции ввиду близости принципов его функционирования к понятию фильтрации.

В соответствии с классической процедурой решения навигационной задачи вектор состояния МОб в геоцентрической связанной системе координат включает в себя подвекторы положения и скорости, сдвиги шкал времени и скорость расхождения шкал времени GNSS и потребителя. В свою очередь, для учета корреляции ошибок измерений, вызванных погрешностями эфемерид навигационного космического аппарата (НКА) и неточностями знания модели ионосферы, в вектор оцениваемых параметров дополнительно включаются векторы состояния НКА. В этом случае суммарная размерность вектора оцениваемых параметров равна $(9 + 8n)$, где n – количество НКА, принятых в обработку. Так, при работе приемника GNSS по всем видимым НКА их число составляет, как правило, от 7 до 24, что приводит к практической нереализуемости фильтра интеграции. С целью сокращения вычислительных затрат путем уменьшения размерности вектора оцениваемых параметров авторами, во-первых, осуществлен перевод навигационных измерений по сети IEEE 802.15.4a в координаты местоположения в относительной системе координат, а во-вторых, для системы GNSS оценки вектора радионавигацион-

ных параметров GNSS, включающего в себя векторы псевдодалномерных измерений по коду и псевдодоплеровских измерений по фазе несущей частоты каждого НКА, переведены в оценки вектора измерений навигационных параметров (НП), включающего в себя подвекторы единичных измерений координат и скоростей. Такой переход к совместному оцениванию вектора НП дает возможность дополнительно уменьшить погрешности позиционирования при использовании практически любого приемника GNSS и технологии позиционирования с использованием сетей связи.

Обобщенная схема построения алгоритма фильтра интеграции НП по измерениям GNSS и измерениям по сети IEEE 802.15.4a приведена на рисунке 1. Как видно из схемы, на вход фильтра поступает только смесь погрешностей (δX) позиционирования по различным каналам измерений, следовательно, погрешность фильтрации не зависит от самих измерений (X) .

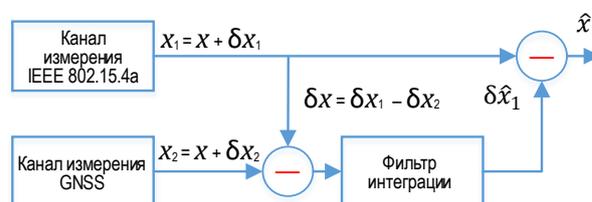


Рис. 1. Обобщенная блок схема реализации алгоритма фильтра интеграции

Для реализации процедуры комплексирования данных координаты местоположения МОб, полученные по измерениям в сети IEEE 802.15.4a в системе прямоугольных координат, переведены в геодезические $B(t)$ и $L(t)$. Перевод в геодезическую систему координат вызван тем, что в ней работают практически все приемники GNSS, а также картографические и геоинформационные системы, используемые потребителями услуг.

Математическим путем были получены выражения для матрицы переходов вектора состояний Φ_{n-1} и переходной матрицы шумов возмущений G_{n-1} , а также матрица A , устанавливающая взаимосвязь состояния x_k в момент времени k с состоянием x_{k-1} во время $k - 1$, и вектор наблюдения B , характеризующий взаимосвязь состояния x_k с управляющим входным сигналом u в момент времени $k - 1$. В этих выражениях использованы следующие обозначения: L – преобразование Лапласа; p – комплексная переменная; I – единичная матрица; $a_i = \sigma_i \sqrt{2\mu_i/\Delta t} [\Delta t/\mu_i + (e^{-\mu_i \Delta t} - 1)\mu_i^{-2}]$; σ_i – дисперсия ошибки измерения координат; μ_i – параметр, характеризующий период (темп) измерения координат объекта (оценки параметров); $i = 1, 2, 3$ – номер ортогональной координаты вектора состояния; $b_i = \sigma_i \sqrt{2\mu_i/\Delta t} [(1 - e^{-\mu_i \Delta t})\mu_i^{-1}]$.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_1^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_2^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_3^{-1} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_1 \mu_1 \\ \sigma_2 \mu_2 \\ \sigma_3 \mu_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\Phi(p) = L^{-1}[pI - A] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 - \mu_1^{-1}e^{-\mu_1 \Delta t} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 - \mu_2^{-1}e^{-\mu_2 \Delta t} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 - \mu_3^{-1}e^{-\mu_3 \Delta t} \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\mu_1 \Delta t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\mu_2 \Delta t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\mu_3 \Delta t} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$G(\Delta t) = \int_0^{\Delta t} \Phi(t)Bdt = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Полученные выражения (1-3) описывают различные измерения в алгоритме фильтра интеграции при непрерывных измерениях НП и представляют собой модель динамики МОБ. Эта модель необходима для адекватной корректировки матрицы прогноза погрешностей вектора состояния при перерывах в навигационных измерениях по любой из систем.

Разработанная модель динамики основывается на предположении, что МОБ движется с постоянным путевым углом и скоростью. Ускорения, вызванные вынужденными маневрами и различного рода возмущающими факторами, рассматриваются как отклонения от номинальных параметров траектории. При этом изменение положения МОБ принимается равновероятным с вероятностью P_0 ; вероятность совершения маневра с максимальной интенсивностью оценивается величиной P_{\max} ; маневренные возможности определяются $\sigma_M^2 = M_{\max} [1 + P_{\max} - P_0] / 3$, где M_{\max} - изменение составляющих вектора скорости с заданными постоянными времени μ_m . Модель используется лишь на относительно коротких интервалах времени отсутствия измерений приемника GNSS или IEEE 802.15.4a (от единиц до десятков секунд), а параметры модели принимаются максимальными.

Для минимизации формульных зависимостей в разработанном алгоритме из оцениваемого вектора состояния МОБ исключены составляющие высоты и времени. В принятых предположениях вектор измерений в геодезической системе координат может быть представлен в виде выражения:

$$Z = |Z_n^{GNSS}, Z_n^{IEEE}|^T = |B_n, L_n, V_{B_n}, V_{L_n}|^T$$

и имеет размерность, равную 4.

Приемник GNSS и IEEE 802.15.4a осуществляют определение координат B_n и L_n , составляющих вектора скорости V_{B_n} и V_{L_n} , а также оценку матрицы их погрешностей R_n . Эти параметры являются вход-

ными для разработанного алгоритма фильтра интеграции; выходными же параметрами являются сглаженные координаты, уточненные составляющие вектора скорости и оценки их погрешностей.

Начальное значение матрицы погрешностей вектора состояния P_n определяются с помощью математического выражения:

$$P_0 = \begin{bmatrix} P_{GNSS_0} & 0 \\ 0 & P_{IEEE_0} \end{bmatrix} * d,$$

где P_{GNSS_n}, P_{IEEE_n} - GNSS- и IEEE 802.15.4a-составляющие погрешностей вектора измерений; n - текущий номер дискретного шага по времени оценивания, $n = 1, 2, 3, \dots$; $n = 0$ - момент времени включения фильтра, d - коэффициент, расширяющий погрешность вектора измерений для первых d результатов обсервации и учитывающий снижение достоверности (для городских подвижных объектов выбран, равный 4). На каждом n -ом шаге фильтрации вычисляется прогноз положения МОБ с учетом счисления координат по составляющим вектора скорости на момент t_n . Далее производится коррекция вектора состояния по результатам разностных измерений.

С целью минимизации вычислительных затрат, путем разложения в степенной ряд Тейлора $e^{-\mu \Delta t}$ и с учетом того, что $\mu \Delta t \ll 1$, для переходной матрицы вектора расстояний получено выражение:

$$\Phi_{n-1}(\Delta t_n)P_{n-1}^+(\Delta t_n)\Phi_{n-1}^T(\Delta t_n) = \begin{bmatrix} K & B_{KV} \\ B_{KV} & V \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где P_n^+ - скорректированная корреляционная матрица погрешностей состояния; T - транспонированная матрица; K, V, B_{KV} - блоки переходной матрицы; $K_{i,j} = p_{i,j} + k_2 p_{i,j+2} + k_2 p_{i+2,j} + k_2^2 p_{i+2,j+2}$ - координатный блок; $V_{i,j} = k_1^2 \begin{bmatrix} p_{33} & p_{34} \\ p_{43} & p_{44} \end{bmatrix}$ - скоростной блок; $B_{KV,i,j} = k_1 (p_{i,j} + k_2 p_{i+2,j})$ - координат-

но-скоростной блок; $k_1 = e^{-\alpha t} = 1 - \mu \Delta t$ и $k_2 = \Delta t -$ коэффициенты.

Для матрицы шумов возмущений получено выражение, где $m_V = m_K = (\sigma \mu)^2$ – определяется статисти-

$$G_{n-1} I G_{n-1}^T = \begin{vmatrix} 0,5 * m_K * \Delta t_n^3 & 0 & m_V * \Delta t_n^2 & 0 \\ 0 & 0,5 * m_K * \Delta t_n^3 & 0 & m_V * \Delta t_n^2 \\ m_V * \Delta t_n^2 & 0 & 2 * \Delta t_n * m_V & 0 \\ 0 & m_V * \Delta t_n^2 & 0 & 2 * \Delta t_n * m_V \end{vmatrix} \quad (5)$$

Далее формируются составляющие вектора разностных измерений каналов GNSS и IEEE 802.15.4a на момент времени t_n по широте и долготе. Для исключения расходимости алгоритма фильтра интеграции приняты дополнительные меры, позволяющие найти оптимальное соотношение между разностной моделью и измерениями приемника GNSS и сети IEEE 802.15.4a. В качестве таких мер в разработанном алгоритме предусмотрена отбраковка аномальных выбросов измерений и промахов, не удовлетворяющих принятым критериям соответствия прогнозируемых и оцененных погрешностей. Для отбраковки выпадающих измерений используется статистика $Z_{n-1} * P_{n-1}^+ * Z_{n-1}^T$, сравниваемая с порогом U , значение которого принимается равным 10 (в присутствии смещения оценки координат на 4,2 м относительно их среднего значения).

Если приемник GNSS или IEEE 802.15.4a не формируют на выходе матрицу погрешностей измерений, то матричные вычисления минимизируются, так как алгоритм фильтра интеграции распадается на два независимых, и по каждой координатной составляющей вычисляется матрица погрешностей прогноза. Затем вычисляется вектор разностных измерений и его матрица погрешностей. С учетом плохой обусловленности измерений в сложных условиях приема сигналов GNSS и IEEE 802.15.4a, устойчивость решения задачи достигается путем дополнительного изменения веса матрицы погрешности вектора разностных измерений δ_n^K :

$$P_{\delta n} = (P_n^- [2:2] + b R_K), \quad (6)$$

где P_n^- – прогнозируемая корреляционная матрица погрешностей состояния; R_K – корреляционная матрица шумов измерений координат, b – весовой коэффициент матрицы погрешностей вектора измерений, характеризующий уровень доверия и определяемый следующим правилом:

$$b = \begin{cases} 1, & \text{если } \delta_n^K * P_{\delta n}^{-1} * (\delta_n^K)^T < U; \\ 10, & \text{если } \delta_n^K * P_{\delta n}^{-1} * (\delta_n^K)^T \geq U. \end{cases} \quad (7)$$

стическими характеристиками разностных измерений в каналах GNSS и IEEE 802.15.4a при отсутствии измерений в любом из каналов $m_K = (\sigma_M \mu_M)^2$ и определяется маневренными характеристиками МОБ:

Экспериментальные исследования

Для проверки работоспособности разработанного алгоритма фильтра интеграции был собран прототип гибридной системы позиционирования, блок схема которого представлена на рисунке 2.

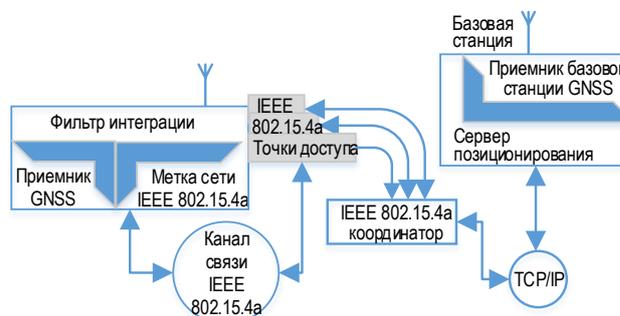


Рис. 2. Обобщенная блок-схема прототипа гибридной системы позиционирования

Приемная часть состоит из A-GNSS-приемника и метки IEEE 802.15.4a. Базовая станция состоит из GNSS-приемника и сервера позиционирования, передающего вспомогательные данные с помощью стека протоколов TCP/IP сетевому координатору IEEE 802.15.4a. Последний получает вспомогательные данные в режиме реального времени и переадресовывает их опорным точкам сети IEEE 802.15.4a. Кроме того, система A-GNSS использует цифровой канал сети IEEE 802.15.4a со скоростью передачи информации до 1 Мбит/с, работающий при расположении МОБ внутри помещения для получения дополнительных данных о его местоположении.

Экспериментальное исследование возможностей предложенного решения объединения данных GNSS и IEEE 802.15.4a дало результаты, представленные на рисунке 3. Зеленым цветом обозначены данные, полученные с помощью системы IEEE 802.15.4a, голубым цветом – GNSS, красным цветом – траектория движения от гибридной системы, использующей разработанный авторами фильтр интеграции. Эксперименты выполнялись для 3-х случаев использования систем позиционирования: только система GNSS, только система IEEE 802.15.4a и интегрированная система с использованием фильтра интеграции.

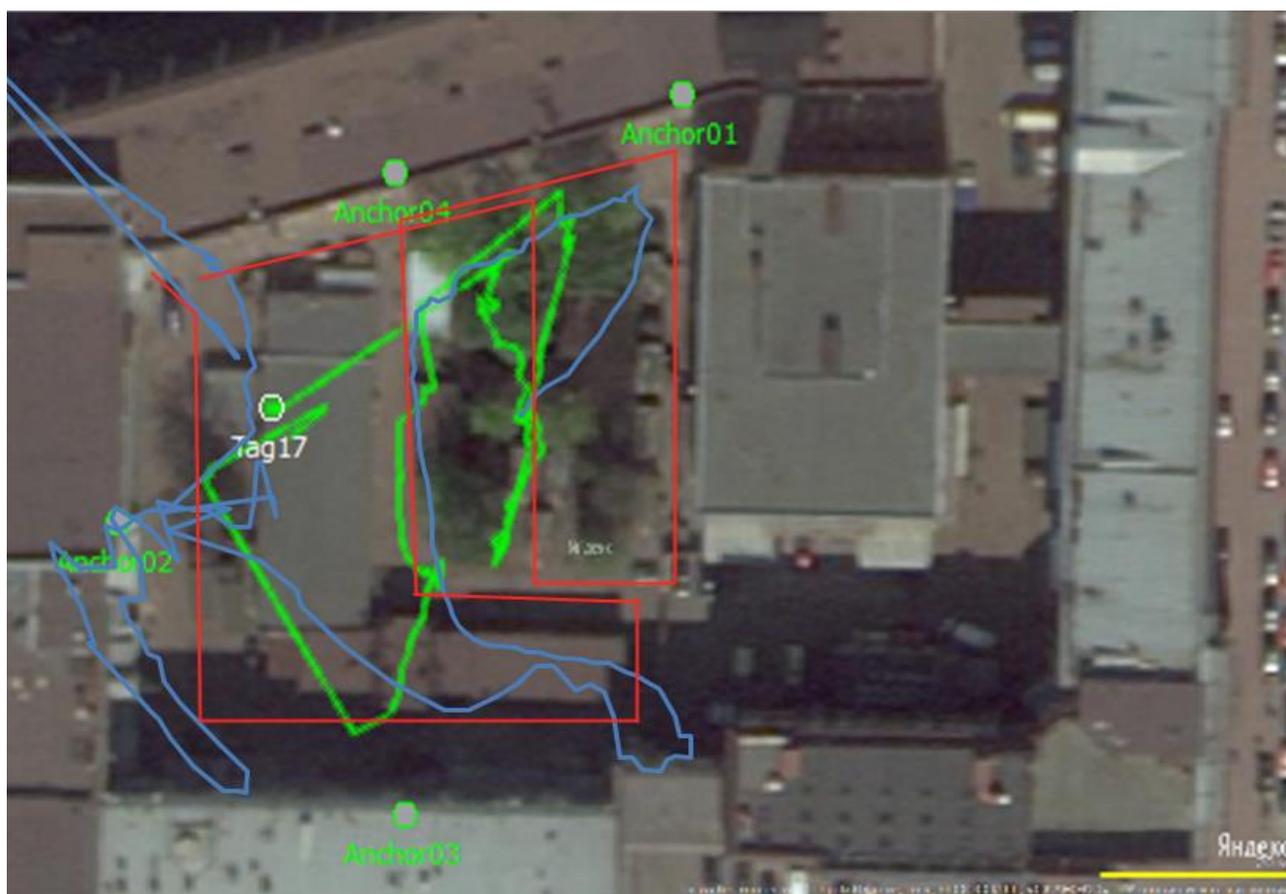


Рис. 3. Графическое представление результатов экспериментов

В интересах наглядности представления значений величины ошибки позиционирования использована обобщенная оценка, характеризующая ошибку по обеим координатам. Для оценки точности определения положения МОБ введена величина MD (от англ. Mean Distance), которая определяется как среднее значение (усреднение по n -измерениям) расстояния между действительным и вычисленным координатами, характеризующими местоположение объекта:

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2},$$

где x_0 и y_0 – истинные координаты МОБ; x_i и y_i – измеренные значения координат; n – количество измерений.

Результаты экспериментальных исследований, выражающиеся в расчетных значениях ошибки позиционирования, относительно истинного местоположения МОБ, для 3-х случаев: открытое и закрытое пространство и переходная область, – сведены в таблицу 1.

Кроме того, результаты экспериментов показали, что основным преимуществом использования сенсорной сети на основе технологии IEEE 802.15.4a перед схожими технологиями определения координат (например, Wi-Fi или GSM) является возможность размещения такого количества узлов, которое необходимо для достижения за-

данной точности позиционирования. Во многих случаях сотовая сеть может выступать в роли транспортной сети для передачи данных о местоположении различных МОБ, оборудованных аппаратурой взаимодействия с сотовыми сетями.

ТАБЛИЦА 1. Результаты экспериментов

Системы позиционирования	Место эксперимента (ошибка позиционирования MD, м)		
	Открытое пространство	Переходная область	Закрытое пространство
GNSS	4,92	5,23	нет результата
IEEE 802.15.4a	3,02	5,00	2,39
Интегрированная система	3,18	3,91	1,92

Кроме того, была подтверждена особенность функционирования построенной гибридной системы позиционирования, связанная с самоорганизующимся характером построения сенсорной сети по технологии IEEE 802.15.4a. При выходе из строя одной из точек доступа внутри помещения, выступающих в качестве опорных точек, процесс локализации не прекращается вследствие динамического перестроения сети. При этом точность определения местоположения снижается, в особенности вблизи вышедшего из строя радиомодуля.

Заключение

Резюмируя изложенное, следует заключить, что принцип функционирования предлагаемого фильтра интеграции, представляющего собой авторскую модификацию известного фильтра Калмана, заключается в замене моделей измерений при наличии НП от приемника GNSS и IEEE 802.15.4a и использовании отбраковки выпадающих измерений при их отсутствии; при этом работа алгоритма осуществляется с переменным шагом квантования по времени.

Данные натурных экспериментов показывают, что разработанный по этому принципу фильтр интеграции позволяет обеспечить «непрерывное» позиционирование МОБ не только на открытой местности, но и внутри помещения. Полученные экспериментальным путем значения, характеризующие местоположение МОБ, свидетельствуют о повышении точности его локализации при использовании алгоритма фильтра интеграции до 20 % в сравнении с непосредственной обработкой данных, что позволяет использовать его в качестве способа повышения точности определения местоположения.

Разработанный авторами алгоритм фильтра интеграции сможет обеспечить, в частности, фик-

сацию передвижения сотрудников в офисных зданиях и на территории промышленных объектов, осуществлять их идентификацию и сопровождение, что может существенно повысить эффективность решения задач обнаружения и локализации широкого класса МОБ, что позволит снизить затраты, связанные с внедрением систем позиционирования. Кроме того, алгоритм фильтра интеграции с незначительными модификациями может использоваться для объединения данных и от других технологических и технических решений, позволяющих определять местоположение мобильного объекта, например Wi-Fi, что делает алгоритм универсальным решением для внедрения услуги позиционирования на промышленном предприятии.

Дальнейшие усилия авторов будут направлены на повышение количества взаимодействующих сетей беспроводного доступа, моделировании реальных помещений, снижение вычислительной сложности (без ущерба для точности) реализуемого алгоритма фильтра интеграции с целью улучшения потребительских свойств и повышения технико-экономических показателей интегрированной системы.

Список используемых источников

1. Rainer M. Overview of Current Indoor Positioning Systems // *Geodesy and Cartography*. 2009. Vol. 35. Iss. 1. PP. 18–22. DOI:10.3846/1392-1541.2009.35.18-22
2. The nanoLOC Development Kit 3.0 2010. Berlin: Nanotron Technologies GmbH, 2010.
3. Mikov A., Moschevikin A., Fedorov A., Sikora A. A localization system using inertial measurement units from wireless commercial hand-held devices // *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Montbeliard-Belfort, France, 28–31 October 2013). Piscataway, NJ: IEEE, 2013. DOI:10.1109/IPIN.2013.6817924
4. Galov A., Moschevikin A. Simultaneous localization and mapping in indoor positioning systems based on round trip time-of-flight measurements and inertial navigation // *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Busan, South Korea, 27–30 October 2014). Piscataway, NJ: IEEE, 2014. PP. 457–464. DOI:10.1109/IPIN.2014.7275517
5. Воронов Р.В., Галов А.С., Мощевикин А.П., Воронова А.М. Задача привязки траектории объекта к плану помещения // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2015. № 2(147). С. 87–91.
6. Агафонов С.Ю. Исследование зависимости точности позиционирования от количества стационарных устройств в сенсорных сетях // *Электросвязь*. 2013. № 10. С. 54–56.
7. Агафонов С.Ю. Точность позиционирования мобильного объекта внутри помещения в сетях nanoNET/nanoLOC // *Вестник связи*. 2016. № 11. С. 19–24.
8. Артюшенко В.В., Киселев А.В., Степанов М.А. Моделирование корреляционных характеристик шумов координат распределенных объектов // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2015. № 4(29). С. 19–27. DOI:10.17212/1727-2769-2015-4-19-27
9. Агафонов С.Ю., Волгушев Д.Б. Влияние количества используемых точек доступа на точность определения местоположения мобильного объекта // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2014. Т. 2. № 2. С. 27–33. URL: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/2-14.pdf> (дата обращения 13.06.2019)
10. Зарубин А.А., Тарлыков А.В., Редругина Н.М., Каляшов Е.В. Локальное позиционирование в режиме реального времени // *Вестник связи*. 2018. № 10. С. 20–22.
11. Серегин Д.Р., Белов Ю.С. Технологии локального позиционирования // *Электронный журнал: наука, техника и образование*. 2017. № 1(10). С. 56–61. URL: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/2d4cf251c906c090e4314d70f0b2c8f8.pdf> (дата обращения 13.06.2019)
12. Богданов Д.В., Гайворонский Д.В. Выбор и анализ структуры пользовательского радиointерфейса локальной системы позиционирования // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2017. № 1. С. 49–55.
13. Ассур О.С. Разработка метода локального позиционирования объектов на основе алгоритмов корреляционно-экстремальных систем // *Известия института инженерной физики*. 2016. № 2(40). С. 20–26.

* * *

INTEGRATION OF SATELLITE RADIO-NAVIGATION SYSTEMS AND INDOOR POSITIONING SYSTEMS

S. Agafonov¹, M. Sivers¹

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

Article info

Article in Russian

For citation: Agafonov S., Sivers M. Integration of Satellite Radio-Navigation Systems and Indoor Positioning Systems. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(2):36–42. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-2-36-42>

Abstract: *This article describes the relevance of expanding mobile object localization service area using wireless technologies, as well as improving the accuracy of localization. In order to solve this problem, has been developed a new algorithm of mobile object positioning data integration from several wireless systems giving an opportunity for mobile object localization both at open space and indoors. Efficiency of the developed algorithm was tested by the prototype of a hybrid positioning system. The usage of the algorithm for integrating data from different positioning systems allows not only to solve the problem of a mobile object location in junction region - from open space to indoor, but also to improve the accuracy of determining its true location.*

Keywords: *wireless sensor networks, positioning accuracy, localization error, complex data processing, data integration, navigation systems, GNSS, IEEE 802.15.4a.*

References

1. Rainer M. Overview of Current Indoor Positioning Systems. *Geodesy and Cartography*. 2009;35(1):18–22. Available from: <https://doi.org/10.3846/1392-1541.2009.35.18-22>
2. *The nanoLOC Development Kit 3.0 2010*. Berlin: Nanotron Technologies GmbH; 2010.
3. Mikov A., Moschevikin A., Fedorov A., Sikora A. A localization system using inertial measurement units from wireless commercial hand-held devices. *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 28–31 October 2013, Montbeliard-Belfort, France*. Piscataway, NJ: IEEE; 2013. Available from: <https://doi.org/10.1109/IPIN.2013.6817924>
4. Galov A., Moschevikin A. Simultaneous localization and mapping in indoor positioning systems based on round trip time-of-flight measurements and inertial navigation. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 27–30 October 2014, Busan, South Korea*. Piscataway, NJ: IEEE, 2014. PP. 457–464. Available from: <https://doi.org/10.1109/IPIN.2014.7275517>
5. Voronov R.V., Galov A.S., Moshchevikin A.P., Voronova A.M. On Indoor Object's Trajectory Trace Adjustment to Building's Floor Plan. *Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2015;2:87–91. (in Russ.)
6. Agafonov S.Yu. Dependence research of positioning accuracy from quantity of devices used in sensor networks. *Electrosvyaz*. 2013;10:54–56. (in Russ.)
7. Agafonov S.Yu. Tochnost pozitsionirovaniia mobilnogo obiekta vnutri pomeshcheniia v setiakh nanoNET/nanoLOC [Mobile Object Indoor Positioning Accuracy in NanoNET/NanoLOC Networks]. *Vestnik*. 2016;11:19–24. (in Russ.)
8. Artyushenko V.V., Kiselev A.V., Stepanov M.A. Modeling of correlation characteristics of distributed object angle noises. *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*. 2015; 4(29):19–27. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2015-4-19-27>
9. Agafonov S.Yu., Volgushev D.B. The Influence of Access Points Quantity to the Accuracy Mobile Object Location Determination. *TelecomIT*. 2014;2(2):27–33. (in Russ.) Available from: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/2-14.pdf> [Accessed 13th June 2019]
10. Zarubin A.A., Tarlykov A.V., Redrugina N.M., Kaliashov E.V. Lokalnoe pozitsionirovanie v rezhime realnogo vremeni [Real Time Local Positioning]. *Vestnik*. 2018;10:20–22. (in Russ.)
11. Seregin D.R., Belov Yu.S. The local positioning technologies. *Elektronnyi zhurnal: nauka tekhnika i obrazovanie*. 2017; 1(10):56–61. (in Russ.) Available from: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/2d4cf251c906c090e4314d70f0b2c8f8.pdf> [Accessed 13th June 2019]
12. Bogdanov D.V., Gayvoronsky D.V. Selection and Analysis of Interface User Structure of the Local Positioning System. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2017;1:49–55. (in Russ.)
13. Assur O.S. Development of a method of local positioning of objects on the basis of correlation-extreme systems algorithms. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*. 2016;2(40):20–26. (in Russ.)