

Исследование технологии сверхширокополосных радиосигналов для решения задачи позиционирования внутри помещений

© А.Р. Новичков¹, И.К. Гончаров^{1,2}, А.Ю. Егорушкин¹,
Н.Н. Фащевский¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»,
Раменское, 140103, Россия

Рассмотрен процесс разработки системы локального позиционирования с помощью системы сверхширокополосных радиосигналов и ее интеграции с бесплатформенной инерциальной навигационной системой (БИНС). В качестве радионавигационной системы использована система на базе технологии Ultra-Wide Band (UWB). Представлен обзор разработанного экспериментального образца комплексированной навигационной системы. Для получения навигационного решения применяются алгоритмы расчета позиции с использованием времени распространения радиосигнала. В работе представлен анализ точности алгоритмов определения дальности Single-Sided Two-Way Ranging, Double-Sided Two-Way Ranging с помощью радиомодуля UWB. Выполнено моделирование ошибок инерциальной навигационной системы и получены предельно допустимые параметры ошибок чувствительных элементов для комплексирования с радионавигационной системой. Определена схема интеграции навигационного решения систем UWB и БИНС.

Ключевые слова: система локального позиционирования, бесплатформенная инерциальная навигационная система, Ultra-Wide Band, Single-Sided Two-Way Ranging, Double-Sided Two-Way Ranging, Time of Flight, Time Difference of Arrival

Введение. Решение задачи определения координат и ориентации объекта в пространстве представляет интерес как теоретический, так и практический. Насколько она актуальна, хорошо представлено в [1–3]. Среди технологий, используемых для решения этой задачи, можно выделить следующие: 1) инерциальную навигацию; 2) навигацию с помощью алгоритмов распознавания изображений, полученных с видеокамер; 3) автономную навигацию с использованием информации о текущей дальности до препятствий, измеренной лазерными дальномерами, а также с применением системы, в основе которой лежит технология измерения дальности с помощью сверхширокополосных радиосигналов. Каждая из этих технологий, естественно, имеет свои преимущества и недостатки, которые можно компенсировать, разработав алгоритмы интеграции между данными системами [4, 5].

Представленные на рынке коммерческие системы локального позиционирования на базе сверхширокополосных радиомодулей (Ultra-Wide Band) состоят из набора синхронизированных приемников, отслеживающих источники UWB-радиосигнала. Возможности использования такой системы ограничиваются сильными переотражениями радиосиг-

нала от препятствий, а также наличием зон не прямой видимости между приемником и излучателем [6].

Для повышения точности и надежности определения координат подвижного объекта целесообразно использовать бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС) на базе микромеханических акселерометров и гироскопов. Цель применения БИНС — обеспечение точного определения координат объекта на коротких промежутках времени. Таким образом, навигационное решение БИНС будет служить фильтром для выявления как ситуаций переотражения радиосигнала от препятствий, так и задержек, связанных с наличием препятствий на пути распространения радиосигнала. Кроме того, интеграция с БИНС позволит получать информацию об угловой ориентации объекта в пространстве.

Для решения поставленной задачи требуется разработать эффективный алгоритм комплексирования БИНС- и UWB-систем и алгоритм калибровки системы UWB. В процессе калибровки определяется расхождение часов приемника и передатчика, что предполагает наличие априорной информации об их взаимном положении в пространстве.

Технология UWB. Сверхширокополосные системы радиосвязи характеризуются абсолютной полосой пропускания более 500 МГц и частотой более 2,5 ГГц или имеют параметр B_{frac} более 0,2 для систем с частотой f_c (при которой система имеет максимальную плотность мощности) ниже 2,5 (рис. 1). Частоты f_h и f_l определяют то место, где значение спектральной плотности мощности на 10 дБ ниже или выше значения f_c соответственно. Величину B_{frac} рассчитывают как отношение

$$B_{frac} = \frac{B}{f_c},$$

где B — полоса пропускания системы.

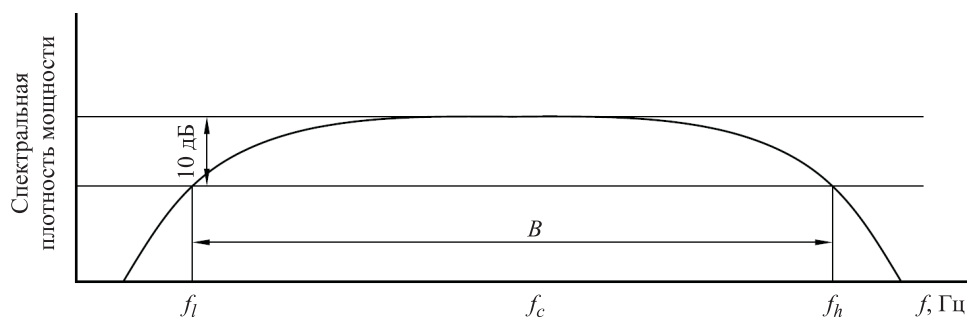


Рис. 1. Нижняя f_l , центральная f_c и верхняя f_h частоты сверхширокополосной системы

Следовательно, используя такие параметры, как высокая и низкая частота, получим соотношения:

$$f_c = \frac{f_h + f_l}{2}; \quad (1)$$

$$B_{frac} = \frac{2(f_h - f_l)}{(f_h + f_l)}. \quad (2)$$

Технология сверхширокополосной радиосвязи изначально разрабатывалась для решения задачи высокоточной навигации внутри помещения. Принцип неопределенности Гейзенберга устанавливает зависимость

$$\Delta f \Delta t \geq 1 / 4\pi,$$

где Δf — полоса пропускания; Δt — длительность импульса радиосигнала.

Приведенное выражение показывает, что чем выше полоса пропускания, тем меньше длительность импульса. Поскольку для UWB имеем $\Delta f = 500$ МГц, длительность импульса будет равна 0,16 нс. Из этого следует, что теоретический предел точности для системы локального позиционирования на базе UWB-радиомодулей находится в субсантиметровом диапазоне.

Для проверки этой гипотезы и получения комбинированного навигационного решения авторы статьи разработали лабораторный аппаратный комплекс. При этом были использованы микромеханические инерциальные чувствительные элементы, класс точности которых сопоставим с точностью инерциальных датчиков, устанавливаемых в современных мобильных устройствах. Следовательно, результаты, полученные при испытаниях с применением рассматриваемого оборудования, в дальнейшем можно будет использовать на мобильной платформе.

В созданную систему входят объекты двух типов:

- радиомаяк (неподвижный объект);
- радиометки (подвижные объекты).

Подвижные радиометки обеспечивают отслеживание местоположения системы и решение задачи навигации внутри помещения. Радиомаяк выступает в роли «спутника» (по аналогии с глобальной навигационной спутниковой системой). В связи с особенностями работы объектов обоих типов для реализации каждого из них разработана своя печатная плата (рис. 2, 3).

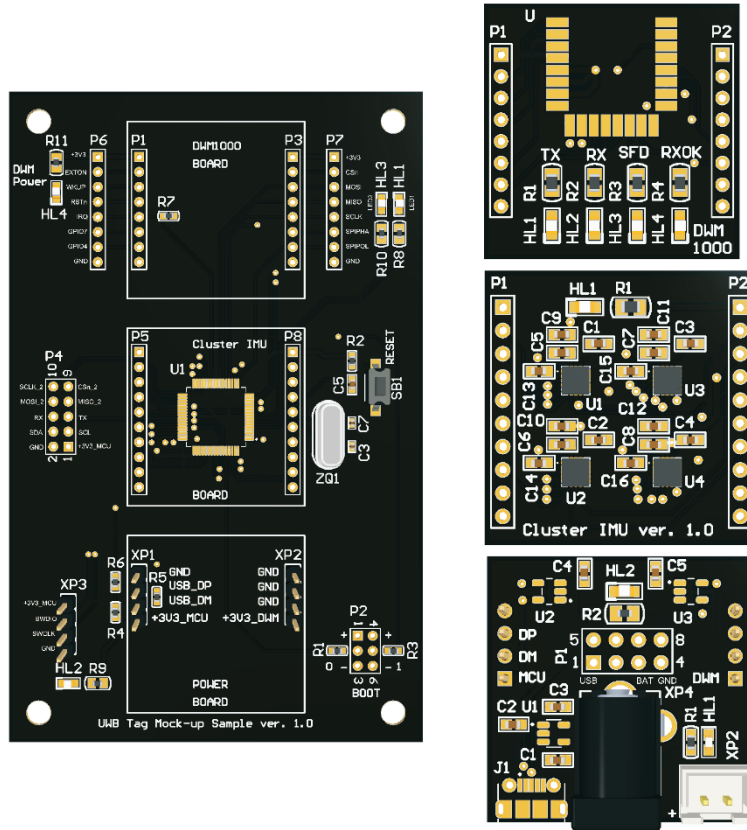


Рис. 2. Печатная плата для метки

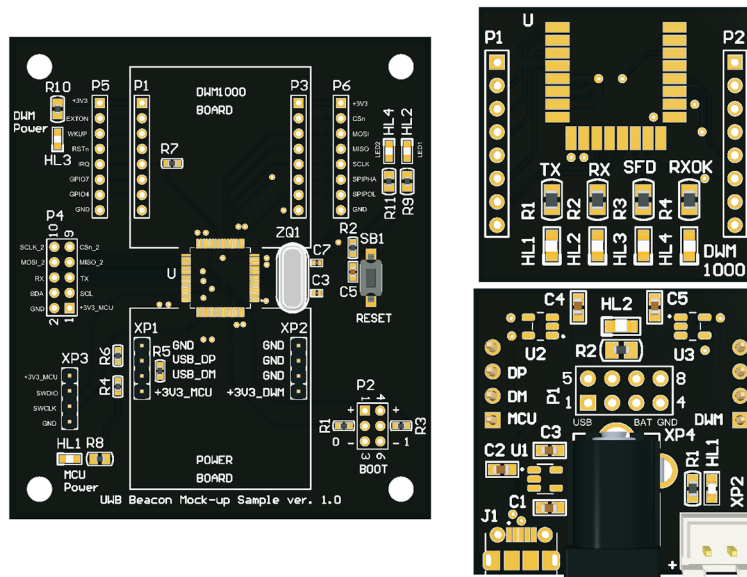


Рис. 3. Печатная плата для радиомаяка

Разработанная печатная плата подвижной метки состоит из четырех блоков. Первый блок — основной, на нем установлен микроконтроллер STM32F412RGT6, обеспечивающий работу навигационного алгоритма. Кроме того, там предусмотрен доступ к дополнительной периферии для отладки аппаратной части макета. Второй блок предназначен для подсоединения UWB-модуля (DWM1000). На третьем блоке размещен кластер микромеханических инерциальных блоков ICM20602, на базе которого реализован навигационный алгоритм БИНС. Четвертый блок обеспечивает питание макета от заранее выбранного источника питания (источника питания на 12 В, USB на 5 В, от аккумулятора мощностью 5 В).

Алгоритмы Time of Arrival (ToA) и Time Difference of Arrival (TDoA). На практике для определения расстояния между радиометками широкое распространение получили методы TDoA (Time Difference of Arrival) и ToF (Time of Flight) [7].

Метод ToA предполагает периодический обмен сообщениями, при котором определяется временная задержка, пропорциональная расстоянию между меткой и маяками. Каждая из оценок расстояния определяет сферическую поверхность, центр которой лежит в точке расположения стационарного маяка. Пересечение трех сферических поверхностей в свою очередь определяет текущее положение мобильной метки (рис. 4).

Для того чтобы при использовании данного алгоритма рассчитать местоположение приемника, необходимо знать расстояние d_i до трех источников с заранее известными координатами (рис. 5).

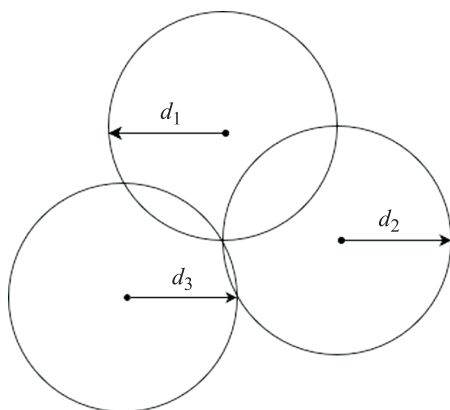


Рис. 4. Три источника сигнала на расстоянии d_i

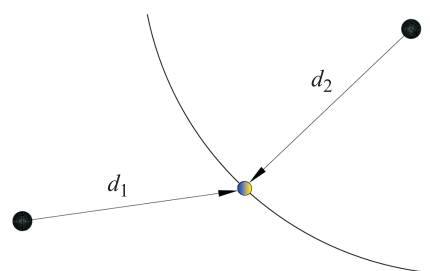


Рис. 5. Позиционирование методом ToA

Таким образом, можно рассчитать точку пересечения трех окружностей, которая и будет оценкой местоположения интересующего узла. Координаты данной точки рассчитывают по формулам:

$$x = \frac{(y_2 - y_1)\gamma_1 + (y_2 - y_3)\gamma_2}{2[(x_2 - x_3)(y_2 - y_1) + (x_1 - x_2)(y_2 - y_3)]}; \quad (3)$$

$$y = \frac{(x_2 - x_1)\gamma_1 + (x_2 - x_3)\gamma_2}{2[(x_2 - x_1)(y_2 - y_3) + (x_2 - x_3)(y_1 - y_2)]}. \quad (4)$$

Здесь

$$\gamma_1 = x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 + d_3^2 - d_2^2; \quad (5)$$

$$\gamma_2 = x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + d_2^2 - d_1^2. \quad (6)$$

Соотношения (3) и (4) получены из системы уравнений

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (7)$$

Для работы с помощью метода TDoA необходимо наличие синхронизированных приемников, но синхронизации между источником и приемником не требуется. В данном случае оценивается разница времени распространения сигнала от источника до приемников. Если сигналы, принятые первым и вторым источником, можно описать как $r_1(t)$ и $r_2(t)$, то τ_1 и τ_2 — оценки времени их распространения соответственно. Поскольку источник и приемник не синхронизированы, данная оценка будет содержать как временную задержку, связанную с распространением радиосигнала, так и величину рассинхронизации. Однако оба приемника синхронизированы между собой, поэтому полученное значение рассинхронизации может быть скомпенсировано:

$$\tau_{\text{TDoA}} = \hat{\tau}_1 - \hat{\tau}_2. \quad (8)$$

Метод TDoA хорош тем, что от мобильной метки требуется только рассылка широкополосного сообщения для сети синхронизированных маяков. Это позволяет максимально понизить ее энергопотребление, повысить мобильность и уменьшить габариты. Однако при реализации RTLS-системы (Real-Time Location System) в случае использования такого подхода потребуются значительные затраты времени для развертывания инфраструктуры синхронизированных стационарных меток, что не всегда возможно вследствие особенностей используемого пространства.

Если TDoA применяется в качестве метода определения расстояния от источников до приемника радиосигнала, то возникает неопределенность в виде гиперболы (рис. 6). Для того чтобы разрешить эту проблему, также необходимы три источника для расчета точки пересечения двух гипербол, которая и будет оценкой местоположения маяка — приемника.

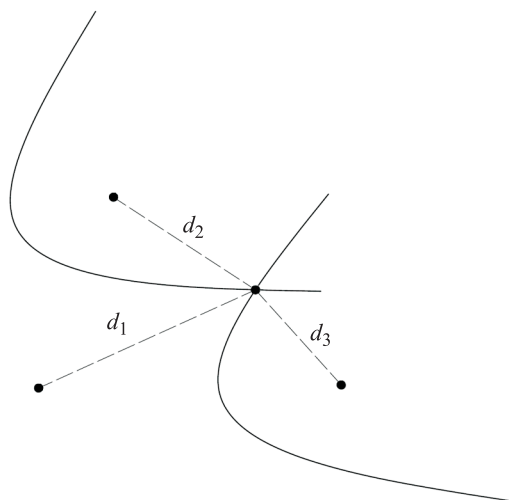


Рис. 6. Позиционирование методом TDoA

Для случая применения трех источников две разницы между пройденным радиосигналом расстоянием могут быть выражены следующим образом:

$$d_{i1}^{\Delta} = d_i - d_1 = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}. \quad (9)$$

Следует отметить, что все приведенные геометрические методы определения местоположения метки справедливы при отсутствии помех в принимаемом сигнале, что, конечно, нереально на практике. Любой радиосигнал содержит случайные ошибки, которые невозможно полностью компенсировать. Тогда при наличии ошибки в принимаемом радиосигнале геометрический способ решения задачи позиционирования не дает возможности разрешить неопределенность, возникающую вследствие пересечения окружностей или гипербол в нескольких точках. Поэтому для решения практических задач позиционирования с помощью сверхширокополосных сигналов требуются интеграция со вспомогательными системами и использование алгоритмов оценки. В данной работе рассматриваются различные методы интеграции UWB-системы и бесплатформенной навигационной системы для повышения надежности расчета координат и пространственной ориентации объекта в условиях зашумленной среды.

Алгоритмы определения времени распространения сигнала с помощью модуля DWM1000. Радиомодуль DWM1000 компании Decawave не реализует алгоритм оценки времени распространения сигнала от метки до маяка, эта задача полностью возлагается на разработчика системы, а DWM1000 лишь предоставляет аппаратные средства для точной фиксации времени отправки-приема пакета данных [6].

Single-Sided Two-Way Ranging (SS-TWR). Принцип работы этого алгоритма заключается в измерении RTT (Round Trip Time delay). Рассмотрим временную диаграмму алгоритма SS-TWR (рис. 7).

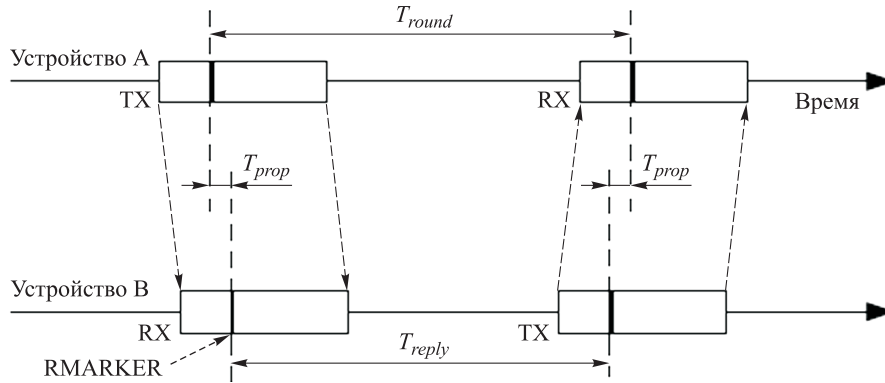


Рис. 7. Временная диаграмма алгоритма Single-Sided Two-Way Ranging

В начальный момент времени устройство А инициирует отправку пакета данных на устройство В и сохраняет метку времени, когда начался обмен сообщениями. Устройство В принимает полученное сообщение, сохраняет метку времени приема сообщения от устройства А и генерирует ответное сообщение, в которое помещает информацию с меткой времени завершения формирования пакета данных, а затем отправляет его на устройство А. Устройство А получает пакет данных со значением времени T_{reply} и фиксирует время T_{round} .

В итоге время распространения сообщения от устройства А до устройства В можно оценить, используя простое соотношение

$$\hat{T}_{prop} = \frac{1}{2}(T_{round} - T_{reply}). \quad (10)$$

Время T_{round} и время T_{reply} измеряются независимо друг от друга на устройстве А и устройстве В с помощью их собственных резонаторов, которые имеют собственные отклонения ea и eb от номинальной частоты соответственно. Следовательно, итоговая оценка \hat{T}_{prop} содержит существенную ошибку, возрастающую с увеличением T_{reply} .

Типовые значения ошибки оценки времени распространения сигнала, полученные в зависимости от времени T_{reply} и стабильности резонатора, приведены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 показывает, основным недостатком этого алгоритма является возрастание ошибки часов в оценке времени распространения с увеличением T_{reply} .

Зависимость времени ответа радиомаяка от ошибки резонатора

T_{reply}	Ошибка часов, нс				
	2 ppm*	5 ppm	10 ppm	20 ppm	40 ppm
211 мкс, 6,81 Мбит/с; 64-символьная преамбула; 96 мкс — задержка на ответ	0,2	0,5	1,1	2,1	4,2
275 мкс, 6,81 Мбит/с; 128-символьная преамбула; 96 мкс — задержка на ответ	0,3	0,7	1,4	2,8	5,5
403 мкс, 6,81 Мбит/с; 256-символьная преамбула; 96 мкс — задержка на ответ	0,4	1,0	2,0	4,0	8,0
*ppm — млн ⁻¹					

Алгоритм Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR) — это усовершенствованная версия алгоритма SS-TWR (рис. 8). В данном случае для оценки времени распространения сигнала используются два раунда обмена сообщениями.

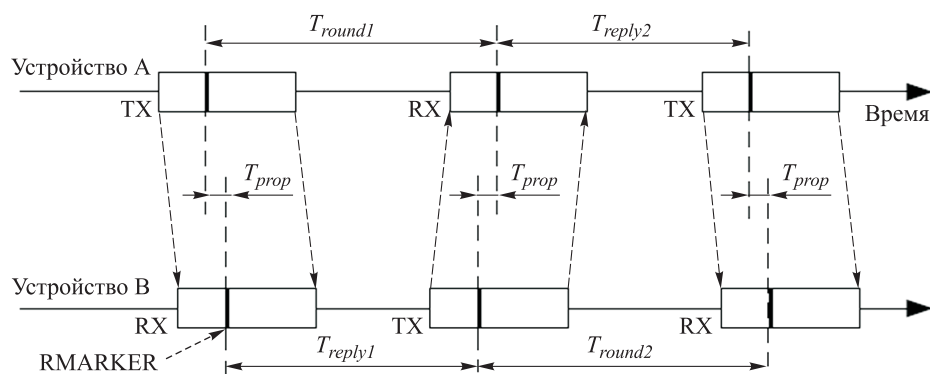


Рис. 8. Временная диаграмма алгоритма Double-Sided Two-Way Ranging

Итоговая оценка времени распространения при использовании метода DS-TWR:

$$\hat{T}_{prop} = \frac{(T_{round1} \times T_{round2} - T_{reply1} \times T_{reply2})}{(T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2})}. \quad (11)$$

Ошибка в определении времени распространения сигнала

$$error = \hat{T}_{prop} \left(1 - \frac{k_a + k_b}{2} \right), \quad (12)$$

где уход часов в устройстве А отличается в k_a раз, а уход часов в устройстве В — в k_b раз.

Данный алгоритм позволяет минимизировать вклад ошибки часов на каждом устройстве в итоговую оценку времени распространения. Для того чтобы дать некоторое представление о том, насколько велика ошибка, рассмотрим один пример. Предположим, что часы на устройствах А и В имеют ошибку дрейфа в 20 ppm. Таким образом, их суммарная ошибка будет равна 40 ppm, следовательно, $k_a = 0,999998$; $k_b = 1,00002$. Даже на расстоянии 100 м между передатчиком и приемником ToF (Time of Flight) она составит 333 нс. Итоговая ошибка $error = (20 \cdot 10^{-6}) \cdot (333 \cdot 10^{-9}) \approx 6,7$ пс.

Исследование точности определения расстояния SS-TWR. Для оценки погрешности определения расстояния с использованием алгоритма SS-TWR проведены измерения для маяка при различных заданных расстояниях от метки. Заданное расстояние определялось с помощью лазерного дальномера. Запись данных велась в течение 10 мин при частоте работы алгоритма 1 Гц. Для каждого измерения оценивались среднее значение, абсолютная погрешность определения расстояния и среднеквадратическое отклонение (СКО) измерений (табл. 2). Перед проведением испытаний была выполнена калибровка аппаратных задержек, используемых в алгоритме SS-TWR, на расстоянии 1 м.

Таблица 2

Результаты испытаний по оценке точности определения расстояния с помощью алгоритма SS-TWR

Заданное расстояние, м	Среднее значение расстояния, м	Ошибка определения расстояния, см	СКО, см
1	1,01892	1,892	3,261
3	3,11479	11,479	2,286
5	5,11006	11,006	3,037

Из анализа полученных результатов следует, что абсолютная ошибка определения расстояния не превышает 20 см. При расстояниях 3 м и 5 м она практически не изменяется. Полученные значения ошибок связаны с ошибками калибровки аппаратных задержек в алгоритме SS-TWR.

Исследование точности определения координат с помощью алгоритма SS-TWR. Оценка точности определения координат радиометки при использовании алгоритма SS-TWR проводилась в подготовленном помещении, внутри которого были установлены радиомаяки (рис. 9).

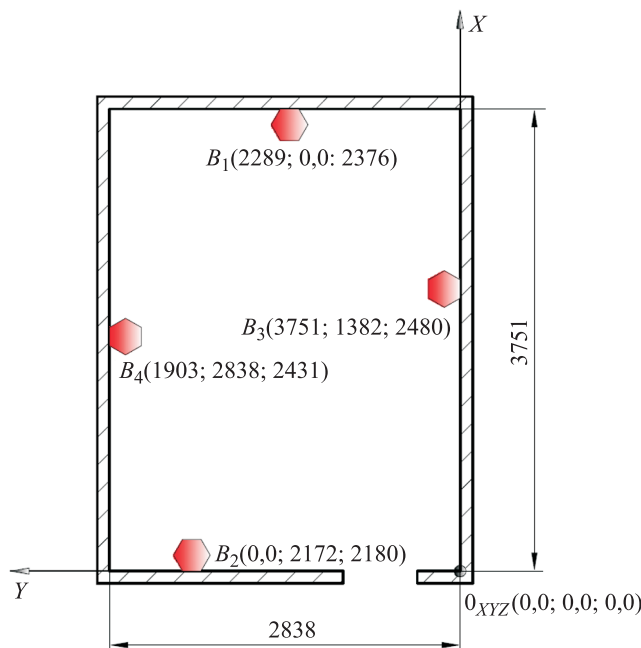


Рис. 9. Расположение маяков на плане помещения при использовании алгоритма SS-TWR:
 B_1, B_2, B_3, B_4 — радиомаяки 1, 2, 3, 4; $OXYZ$ — система координат

Оси трехмерной системы координат в помещении заданы следующим образом: ось X направлена от входа в помещение вдоль длинной стены, ось Y — от входа в помещение вдоль короткой стены, ось Z — от пола к потолку. Для каждого из радиомаяков координаты были определены лазерным дальномером (табл. 3).

Таблица 3

Координаты радиомаяков внутри подготовленного помещения при использовании алгоритма SS-TWR

Номер маяка	Значение координаты, см		
	X	Y	Z
1	2289	0	2376
2	0	2172	2180
3	3751	1382	2480
4	1903	2838	2431

Точность определения координат метки исследовалась в трех положениях, для каждого из которых были измерены координаты (табл. 4) и расстояния до всех маяков.

В каждом положении в течение 30 мин записывались результаты определения координат методом трилатерации, а затем выполнялся

расчет абсолютной ошибки определения координат для среднего значения и среднеквадратического отклонения рассчитанных значений координат. Следует заметить, что определение координат с помощью алгоритма трилатерации проводилось для четырех комбинаций маяков, а также вычислялось среднее значение координат. Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Таблица 4

Координаты положений метки внутри подготовленного помещения при использовании алгоритма SS-TWR

Номер положения	Значение координаты, см		
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
1	1308	1068	950
2	2508	989	964
3	540	1674	964

Таблица 5

Результаты испытаний по оценке точности определения координат при использовании алгоритма SS-TWR

№	Тройка маяков	Ошибка определения координаты <i>X</i> , см	СКО <i>X</i> , см	Ошибка определения координаты <i>Y</i> , см	СКО <i>Y</i> , см	Ошибка определения координаты <i>Z</i> , см	СКО <i>Z</i> , см
1	1–2–3	18,481	2,416	37,675	3,393	3,492	2,962
	2–3–4	7,027	2,458	5,251	6,302	26,681	4,923
	3–4–1	32,085	4,25	24,841	2,414	24,192	6,07
	4–1–2	1,652	3,193	20,237	2,59	0,192	2,506
	Среднее	14,811	2,213	19,375	2,637	0,299	2,69
2	1–2–3	16,895	2,094	13,505	4,229	32,489	2,207
	2–3–4	3,589	3,221	43,441	6,955	48,9	3,714
	3–4–1	34,844	5,159	4,682	2,358	21,847	2,094
	4–1–2	3,941	3,988	9,861	2,422	16,888	2,713
	Среднее	12,847	2,969	11,12	2,475	30,031	1,928
3	1–2–3	22,574	3,193	54,946	4,216	2,083	3,619
	2–3–4	2,679	2,138	27,202	6,222	30,357	2,385
	3–4–1	–	–	–	–	–	–
	4–1–2	11,177	2,675	20,388	2,548	9,134	2,254
	Среднее	4,692	2,2	16,044	2,646	12,47	2,372

Использование алгоритма SS-TWR для оценки расстояния от метки до маяков позволяет определять координаты с абсолютной ошибкой менее 60 см при работе только с одной из возможных троек

маяков. При этом СКО значений рассчитанных координат не превышает 7 см.

По полученным данным можно сделать вывод, что функционирование со средним значением четырех комбинаций маяков оказывается стабильнее, чем при использовании только фиксированной комбинации маяков. Абсолютная ошибка определения координаты таким способом не превышает 30 см, а СКО — 3 см.

Исследование точности определения расстояния DS-TWR. Оценка погрешности определения расстояния при использовании алгоритма DS-TWR проводилась путем измерений для метки на различных заданных расстояниях от маяка. В каждом положении данные записывались в течение 10 мин при частоте работы алгоритма 1 Гц. Проводились оценки среднего значения, абсолютной погрешности определения расстояния и среднеквадратического отклонения измерений. Полученные результаты представлены в табл. 6. Перед испытаниями проводилась калибровка алгоритма DS-TWR на расстоянии 1 м.

Таблица 6

Результаты испытаний по оценке точности определения расстояния при использовании алгоритма DS-WR

Заданное расстояние, м	Среднее значение расстояния, м	Ошибка определения расстояния, см	СКО, см
1	1,07798	7,798	2,01
3	3,14174	14,174	2,162
5	5,11781	11,781	1,876

Из полученных результатов видно, что абсолютная погрешность определения расстояния составляет менее 15 см, СКО рассчитанных значений — примерно 2 см.

Исследование точности определения координат DS-TWR. При исследовании точности определения координат с помощью алгоритма DS-TWR были сохранены конфигурация меток и маяков, а также ориентация осей локальной системы координат, принятая ранее в эксперименте с применением алгоритма SS-TWR. Результаты, представленные в табл. 7, получены в ходе эксперимента с применением алгоритма DS-TWR.

Использование алгоритма DS-TWR для оценки расстояния от метки до маяков обеспечивает возможность определять координаты с абсолютной ошибкой менее 60 см при работе только с одной из возможных троек маяков, СКО значений рассчитанных координат не превышает 8 см. Полученные данные позволяют судить о том, что расчет среднего значения четырех комбинаций маяков оказывается

стабильнее, чем расчет с использованием только определенной комбинации маяков. Абсолютная ошибка определения координаты таким способом не превышает 36 см, а СКО — 3 см.

Таблица 7

Результаты испытаний по оценке точности определения координат при использовании алгоритма DS-TWR

Номер эксперимента	Тройка маяков	Ошибка определения координаты X, см	СКО X, см	Ошибка определения координаты Y, см	СКО Y, см	Ошибка определения координаты Z, см	СКО Z, см
1	1–2–3	22,267	2,245	43,695	3,168	4,747	2,921
	2–3–4	5,153	2,173	21,478	4,842	37,616	3,472
	3–4–1	43,173	3,8	24,186	2,03	39,389	6,603
	4–1–2	3,439	2,785	17,074	1,994	0,472	2,217
	Среднее	16,789	2,064	15,869	2,051	1,512	2,68
2	1–2–3	21,153	3,123	4,035	3,798	36,778	2,0
	2–3–4	12,948	3,213	30,923	7,551	47,286	4,328
	3–4–1	32,169	5,241	7,113	2,161	30,047	1,57
	4–1–2	8,303	4,027	10,316	2,434	27,813	1,996
	Среднее	18,643	2,945	11,081	2,54	35,481	1,724
3	1–2–3	22,906	3,148	55,671	4,272	1,672	3,404
	2–3–4	3,168	1,926	25,872	5,677	33,739	2,005
	3–4–1	–	–	–	–	–	–
	4–1–2	10,606	2,288	21,361	2,405	12,84	1,923
	Среднее	5,156	2,004	17,053	2,448	16,084	2,026

Таким образом, были проведены испытания для оценки возможной точности алгоритмов определения расстояния с помощью модулей UWB Single-Sided Two-Way Ranging и Double-Sided Two-Way Ranging. Основное преимущество алгоритма SS-TWR — относительная простота реализации, главный недостаток — зависимость погрешности определения расстояния от дрейфа кварцевого резонатора на каждом из устройств: метке и маяке. Преимущество алгоритма DS-TWR заключается в зависимости конечной оценки времени распространения сигнала только от дрейфа часов на одном из устройств, обменивающихся сообщениями: на маяке или на метке, что позволяет существенно повысить точность системы в результате установки более точного кварца только на одном из устройств. Однако следует заметить, что данный алгоритм более чувствителен к настройке. При разработке системы также необходимо учитывать, что информацию о расстоянии рассчитывают маяки и пересылают ее на метку только во время следующего раунда обмена сообщениями. Таким образом,

метка рассчитывает свои координаты с задержкой, равной периоду обмена сообщениями между меткой и маяком, что в некоторых вариантах использования может оказаться недопустимым.

Полученные результаты испытаний позволяют сделать вывод о том, что алгоритмы SS-TWR и DS-TWR показывают идентичные характеристики по точности. Абсолютная ошибка определения расстояния составила менее 20 см, ошибка определения координат при использовании среднего значения из четырех комбинаций маяков — менее 36 см. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости модернизации калибровки аппаратных задержек маяков и меток для повышения точности результатов, получаемых с помощью алгоритма DS-TWR.

Оценка точности ИНС. Для оценки точности автономной работы БИНС в составе печатной платы были использованы уравнения ошибок автономной работы ИНС. Данные уравнения учитывают медленно изменяющуюся составляющую ошибки, не зависящую от горизонтального ускорения объекта. Нестационарные погрешности, зависящие от ускорения и обусловленные погрешностью масштабных коэффициентов акселерометров, которые представляют собой высокочастотную ошибку, модулирующую медленно изменяющуюся шулеровскую, не учитывались в данной модели.

Для связи выходных параметров ИНС (угол крена, тангажа, курса, широты, долготы) были использованы следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \varphi_x(t) = & \varphi_x(0)\cos(\vartheta t) - U\cos\varphi\frac{\sin(vt)}{v}\varphi_z(0) - \frac{\sin(vt)}{vR}\delta V_y(0) + \\ & + \frac{\sin(vt)}{v}\xi_x - U\cos\varphi\frac{(1-\cos(vt))}{v^2}\xi_z - \frac{(1-\cos(vt))}{v^2R}B_y^0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \varphi_y(t) = & \varphi_y(0)\cos(\vartheta t) + \frac{1}{vR}\sin(vt)\delta V_x(0) + \\ & + \frac{\sin(vt)}{v}\xi_y + \frac{(1-\cos(vt))}{v^2R}B_y^0, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \varphi_z(t) = & \varphi_x(0)U\cos(\varphi t) + \varphi_y(0)(1-\cos(vt))\operatorname{tg}\varphi + \frac{\operatorname{tg}\varphi\sin(vt)}{vR}\delta V_x(0) - \\ & - \left(t - \frac{\sin(vt)}{v}\right)\operatorname{tg}\varphi\xi_y + \operatorname{tg}\varphi\frac{(1-\cos(vt))}{v^2R}B_x^0 + \varphi_z(0) + \xi_z t; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \delta V_E(t) = & -\varphi_y(0)Rv\sin(vt) + \delta V_x(0)\cos(vt) - \\ & - \xi_y R(1-\cos(vt)) + \frac{\sin(vt)}{v}B_x^0, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \delta V_N(t) = & \varphi_x(0)Rv \sin(vt) + \cos(vt)\delta V_y(0) + \\ & + \xi_x R(1 - \cos(vt)) + \frac{\sin(vt)}{v} B_y^0, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\lambda(t) = \int \frac{\delta V_E}{R \cos \varphi}(t) dt; \quad (18)$$

$$\varphi(t) = \int \delta V_N(t) dt, \quad (19)$$

где $v = \sqrt{\frac{g}{R}}$ — шулеровская частота колебания; B_x^0, B_y^0 — смещения нулей акселерометров; ξ_x, ξ_y, ξ_z — дрейф гироскопа.

Для того чтобы оценить остаточную случайную составляющую погрешности для акселерометра и гироскопа с целью использования данных значений в уравнениях (13)–(19), была выполнена запись измерений непосредственно с чувствительных элементов (ЧЭ) на протяжении 2 ч. По результатам измерений были построены графики девиации Аллана (рис. 10) [8].

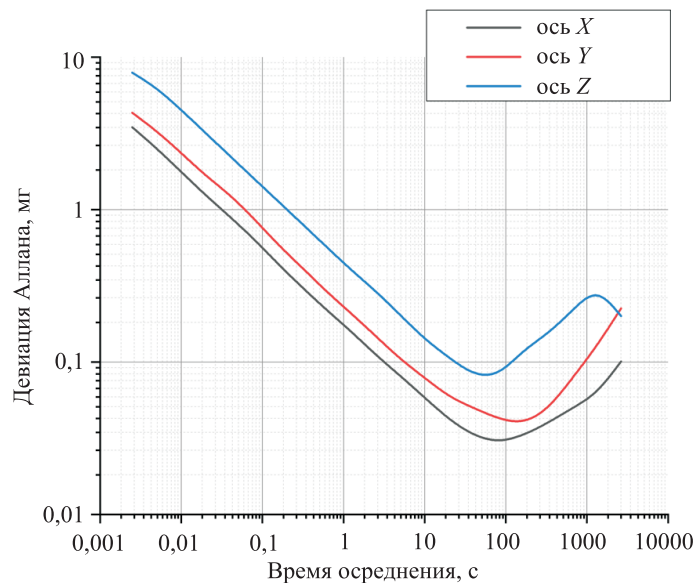


Рис. 10. Девиации Аллана для акселерометра

Полученный график девиации Аллана (см. рис. 10) позволяет оценить остаточную случайную погрешность, содержащуюся в выходных данных акселерометра в составе инерциального измерительного блока ICM20602, установленного на метке [9]. Если исходить из уравнений (13)–(19), то можно сделать вывод, что остаточная погрешность акселерометра не вносит существенного вклада в ошибку

определения выходных координат. Данная ошибка будет влиять исключительно на расчет пространственной ориентации.

Нарастание ошибки определения угла тангажа и крена в течение 5 с автономной работы инерциальной навигационной системы представлено на графиках (рис. 11 и 12).

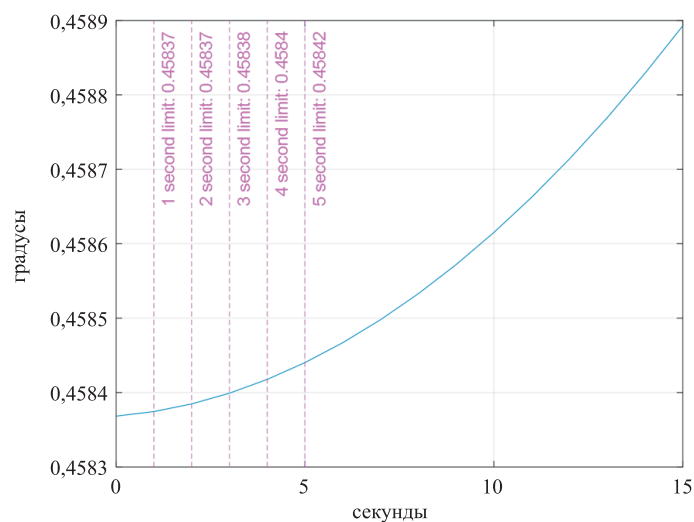


Рис. 11. Нарастание ошибки в определении угла тангажа при автономном режиме работы ИНС ($B_x = B_y = 0,01 \text{ м/с}^2$)

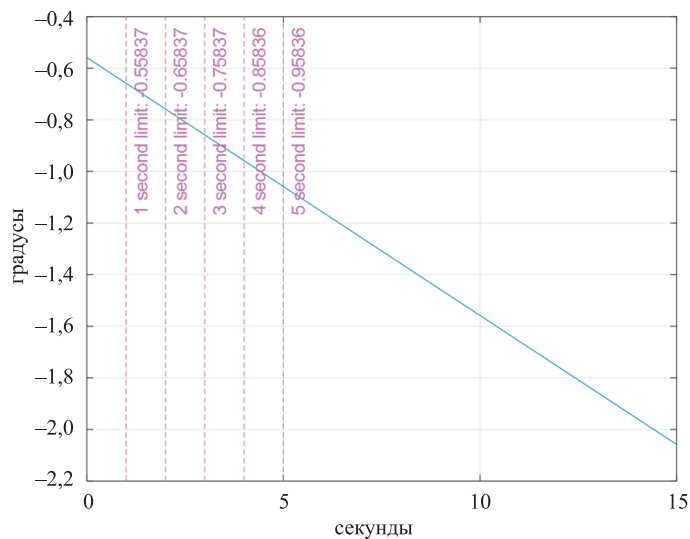


Рис. 12. Нарастание ошибки в определении угла крена при автономном режиме работы ИНС ($B_x = B_y = 0,01 \text{ м/с}^2$)

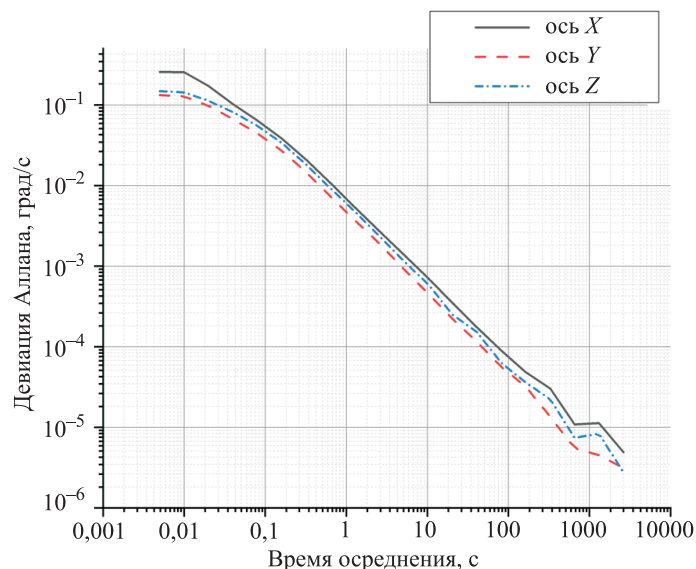


Рис. 13. Девиация Аллана для гироскопа

График девиации Аллана для гироскопа в составе радиометки приведен на рис. 13.

Для получения шумовых характеристик проводилась оценка девиации Аллана.

Дрейф гироскопов является основной составляющей ошибки определения координат в процессе автономной работы ИНС. Именно поэтому главной задачей исследования точности чувствительных элементов был анализ остаточных погрешностей гироскопов. Из анализа графика, приведенного на рис. 13, понятно, что значение дрейфа на интервале осреднения 0,01 с не превышает $\xi_x = \xi_y = \xi_z = 360$ град/ч.

Если подставить данное значение в уравнения ошибок ИНС, можно получить графики нарастания выходной ошибки в определении координат (рис. 14).

Полученные результаты подтвердили возможность использования ИНС на базе микромеханических чувствительных элементов для поддержания навигационного решения в моменты отсутствия сигнала от UWB. Проведенные расчеты позволили оценить максимальное время пропадания радиосигнала, в течение которого система способна выдавать решение в заявленном диапазоне точности.

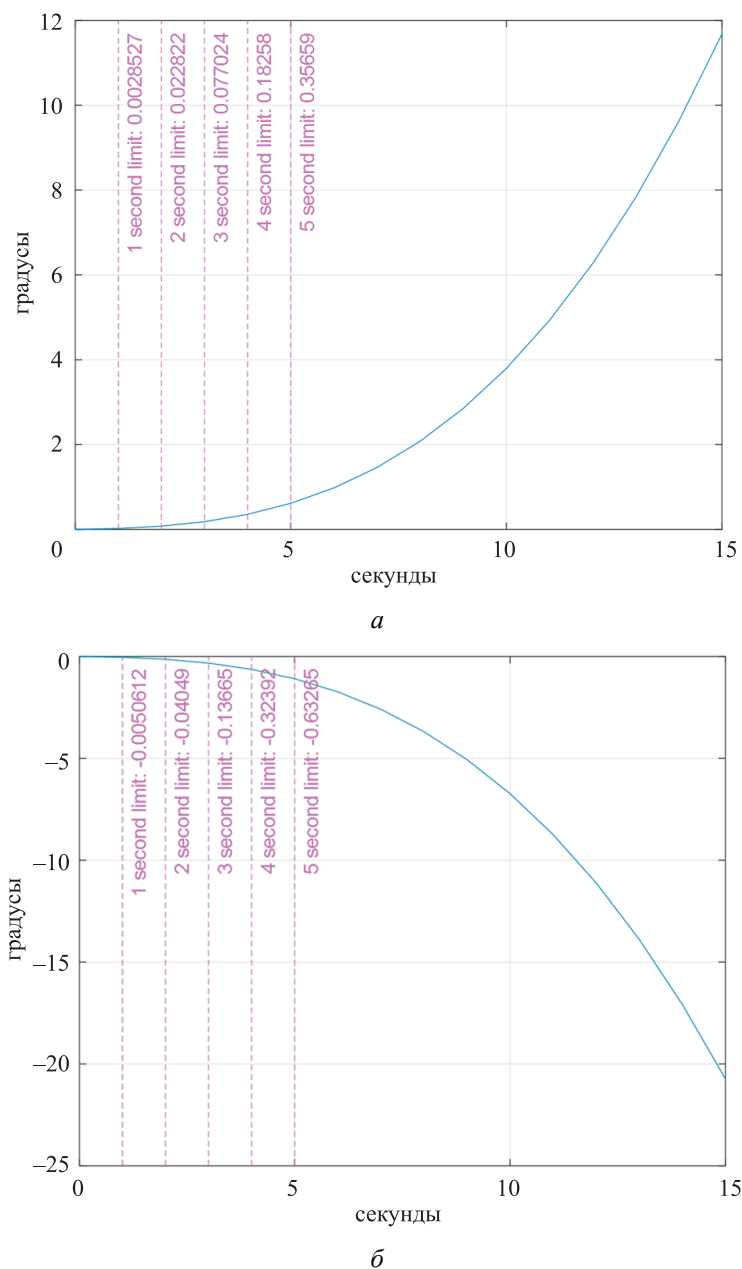


Рис. 14. График нарастания ошибки в определении широты (а) и долготы (б) места при автономном режиме работы ИНС ($\xi_x = \xi_y = \xi_z = 360$ град/ч)

Заключение. В процессе работы были изготовлены экспериментальные образцы метки (1 шт.) и маяка (4 шт.), в составе которых имеются UWB-модули для реализации радионавигационной системы. На метке установлены трехосные микромеханические акселерометр и гироскоп, на базе которых реализована БИНС.

Для проверки и отладки алгоритмов подготовлена тестовая площадка (помещение) размерами $3,7 \times 2,8 \times 2,7$ м.

В процессе проведения работ были реализованы и протестированы два алгоритма определения расстояния в радионавигационной системе — SS-TWR и DS-TWR, которые продемонстрировали ошибку определения расстояния менее 20 см. Наиболее стабильные характеристики по расчету координат обеспечил метод, при котором используется среднее значение из рассчитанных наборов координат для четырех комбинаций троек маяков. В этом случае ошибка определения координат составила менее 36 см.

Оценка точности инерциальных чувствительных элементов показала, что на их основе возможно построение БИНС, а также использование показаний БИНС в течение 3 с, когда пропадает сигнал UWB. При этом погрешность БИНС не превысит погрешность определения координат с использованием радионавигационной системы. По результатам проведенных экспериментов начата разработка алгоритма расчета параметров навигации и ориентации для демпфируемой БИНС [10].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yao L., Wu Y., Yao Lei, Liao Z.Z. An integrated IMU and UWB sensor based indoor positioning system. *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. IEEE, 2017, pp. 1–8. DOI: 10.1109/IPIN.2017.8115911
- [2] Sahinoglu Z., Gezici S., Guvenc I. *Ultra-wideband positioning systems*. Cambridge, New York, 2008, pp. 74–92.
- [3] Агафонов С.Ю., Сиверс М.А. Интеграция спутниковых радионавигационных систем и систем позиционирования внутри помещения. *Труды учебных заведений связи*, 2019, № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-sputnikovyh-radionavigatsionnyh-sistem-i-sistem-pozitsionirovaniya-vnutri-pomescheniya> (дата обращения 23.02.2021).
- [4] Hol J.D. *Sensor fusion and calibration of inertial sensors, vision, ultra-wideband and GPS: Diss.* Linköping University Electronic Press, 2011.
- [5] Xu Y., Shen T., Chen X.-Y., Bu L.-L. Predictive adaptive Kalman filter and its application to INS/UWB-integrated human localization with missing UWB-based measurements. *International Journal of Automation and Computing*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 604–613. DOI: 10.1007/s11633-018-1157-4
- [6] Sidorenko J., Scherer-Negenborn N., Arens M., Schatz V. Decawave UWB clock drift correction and power self-calibration. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 13, paper ID 2942. DOI: 10.3390/s19132942
- [7] Kulmer J., Grosswindhager B., Grebien S., Rath M., et al. Using DecaWave UWB transceivers for high-accuracy multipath-assisted indoor positioning. *2017 Conference: IEEE ICC Workshop on Advances in Network Localization and Navigation (ANLN) at: Paris, France*. IEEE, 2017, pp. 1239–1245. DOI: 10.1109/ICCW.2017.7962828
- [8] *Decawave*. DW1000 User Manual 2.18. URL: <https://www.decawave.com/dw1000/usermanual> (дата обращения 30.03.2021).

- [9] Yuksel Y., Kaygisiz H.B. *Notes on Stochastic Errors of Low-Cost MEMS Inertial Units*.
URL: http://instk.org/web/static/bibliography/Introduction_to_Sensor_Errors.pdf
- [10] Board I. *IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros*. IEEE; Piscataway, NJ, USA, 1998, IEEE Standard, pp. 952–1997. [Google Scholar]
- [11] Salychev O.S. *MEMS-based inertial navigation: Expectations and reality*. Moscow, BMSTU Publ., 2012, 208 p.

Статья поступила в редакцию 07.05.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Новичков А.Р., Гончаров И.К., Егорушкин А.Ю., Фашевский Н.Н. Исследование технологии сверхширокополосных радиосигналов для решения задачи позиционирования внутри помещений. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-12-2140>

Новичков Артем Романович — аспирант кафедры «Системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: novichkovar@student.bmstu.ru

Гончаров Илья Константинович — аспирант кафедры «Системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана; инженер-конструктор АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро».
e-mail: goncharov.ik@gmail.com

Егорушкин Алексей Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: egorushkin@bmstu.ru

Фашевский Николай Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: fashnic@mail.ru

Investigation of UWB RF signal technology for solving indoor positioning problem

© A.R. Novichkov¹, I.K. Goncharov^{1,2},
A.Yu. Egorushkin¹, N.N. Fashchevsky¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²JSC “Ramenskoye Instrument-making Design Bureau”, Ramenskoye, 140103, Russia

The article considers the process of developing a local positioning system using an ultra-wideband radio signal system and its integration with a strapdown inertial navigation system (SINS). A system based on Ultra-Wide Band (UWB) technology is used as a radio navigation system. An overview of the developed experimental integrated navigation system model is presented. Algorithms for calculating the position using the propagation time of the radio signal are used to obtain a navigation solution. An analysis of the accuracy of Single-Sided Two-Way Ranging and Double-Sided Two-Way Ranging algorithms using a UWB radio module is presented. The modeling errors of the inertial navigation system were performed. The maximum permissible parameters of the sensitive element errors were obtained for integration with the radio navigation system. The scheme of integration of the navigation solution of the UWB and SINS systems is determined.

Keywords: indoor location system, strapdown inertial navigation system, Ultra-Wide Band, Single-Sided Two-Way Ranging, Double-Sided Two-Way Ranging, Time of Flight, Time Difference of Arrival

REFERENCES

- [1] Yao L., Wu Y., Yao Lei, Liao Z.Z. An integrated IMU and UWB sensor based indoor positioning system. *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. IEEE Publ., 2017, pp. 1–8. DOI: 10.1109/IPIN.2017.8115911
- [2] Sahinoglu Z., Gezici S., Guvenc I. *Ultra-wideband positioning systems*. New York, Cambridge University Press Publ., 2008, pp. 74–92.
- [3] Agafonov S.Yu., Sivers M.A. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi — Proceedings of Telecommunication Universities*, 2019, no. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-sputnikovyh-radionavigatsionnyh-sistem-i-sistem-pozitsionirovaniya-vnutri-pomescheniya> (accessed February 23, 2021).
- [4] Hol J.D. Sensor fusion and calibration of inertial sensors, vision, ultra-wideband and GPS. *Linköping studies in science and technology. Dissertations, no. 1368*. Sweden, Linköping, Linköping University Electronic Press Publ., 2011.
- [5] Xu Y., Shen T., Chen X.-Y., Bu L.-L. *International Journal of Automation and Computing*, 2018, vol. 16, no. 5, pp. 604–613. DOI: 10.1007/s11633-018-1157-4
- [6] Sidorenko J., Scherer-Negenborn N., Arens M., Schatz V. Decawave UWB clock drift correction and power self-calibration. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 13, paper ID 2942. DOI: 10.3390/s19132942
- [7] Kulmer J., Grebien S., Grosswindhager B., Rath M., Bakr M.S., Leitinger E., Witrisal K. Using DecaWave UWB transceivers for high-accuracy multipath-assisted indoor positioning. *2017 Conference: IEEE ICC Workshop on Advances in Network Localization and Navigation (ANLN) at: Paris, France*. IEEE, 2017, pp. 1239–1245. DOI: 10.1109/ICCW.2017.7962828

- [8] Decawave. *DW1000* User Manual 2.18. Available at: <https://www.decawave.com/dw1000/usermanual> (accessed March 30, 2021).
- [9] Yuksel Y. Kaygisiz H.B. *Stochastic Errors of Low-Cost MEMS Inertial Units*. 2011. Available at: [http://www.instk.org/web/static/bibliography/Introduction to Sensor Errors. pdf](http://www.instk.org/web/static/bibliography/Introduction%20to%20Sensor%20Errors.pdf)
- [10] IEEE Std 952™-1997 (R2008). *IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros*. USA, New York, NY, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Publ., 2008, pp. 952–1997.
- [11] Salychev O. S. *MEMS-based inertial navigation: Expectations and reality*. Moscow, BMSTU Publ., 2012, 208 p.

Novichkov A.R., post-graduate student, Department of Orientation, Stabilization and Navigation Systems, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: novichkovar@student.bmstu.ru

Goncharov I.K., post-graduate student, Department of Orientation, Stabilization and Navigation Systems, Bauman Moscow State Technical University. Design engineer of JSC “Ramenskoye Instrument-making Design Bureau”.
e-mail: goncharov.ik@gmail.com

Egorushkin A.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Orientation, Stabilization and Navigation Systems, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: egorushkin@bmstu.ru

Fashevsky N.N., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Orientation, Stabilization and Navigation Systems, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: fashnic@mail.ru