

Синтез алгоритма синхронизации шкал времени локальной навигационной системы, использующей сверхширокополосные сигналы...

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛ ВРЕМЕНИ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ, И ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. На сегодняшний день широко распространены позиционные локальные навигационные системы, которые решают ряд практических задач: мониторинг сотрудников на предприятиях, координатное обеспечение беспилотных летательных аппаратов в помещениях и на открытых пространствах. Однако проблема таких систем заключается в том, что, когда потребитель выходит за пределы рабочей зоны, система не способна обеспечить заданную точность координатных определений. В качестве решения данной проблемы можно предложить обеспечение бесшовной навигации, использующей интеграцию локальной навигационной системы с приемником глобальной навигационной спутниковой системы. Стоит отметить, что существующих решений очень мало и они не затрагивают аппаратную часть приборов, а работают с уже готовыми измерениями от приемника глобальной навигационной спутниковой системы и локальной навигационной системы. В данной статье представлен разработанный метод синхронизации шкал времени приемника глобальной навигационной спутниковой системы и устройства, использующего сверхширокополосные радиосигналы. Синтезирован алгоритм оценки смещения шкал времени. Предложенный метод синхронизации шкал позволяет обеспечивать бесшовную навигацию и совместную обработку измерений и устройства, использующего сверхширокополосные радиосигналы, и приемника глобальной навигационной спутниковой системы.

Ключевые слова: локальная навигационная система, АНС, приемник глобальной навигационной спутниковой системы, ГНСС, синхронизация шкал.

Для цитирования: Евсеев А.Д., Оробченко С.В., Чугунов А.А., Кочка К.В., Малышев А.П., Черных С.В. Синтез алгоритма синхронизации шкал времени локальной навигационной системы, использующей сверхширокополосные сигналы, и глобальной навигационной спутниковой системы // Вестник Российской нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2025. № 2. С. 94 – 103. DOI: 10.18137/RNUV9187.25.02.P.94

SYNTHESIS OF AN ALGORITHM FOR SYNCHRONIZATION OF TIME SCALES OF LOCAL NAVIGATION SYSTEM USING ULTRA-WIDEBAND SIGNALS AND GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM

Abstract. Today, position-based local navigation systems (LNS) are widespread, which solve a number of practical problems, such as employee monitoring at enterprises, coordinate support of UAVs in indoor and outdoor areas. However, the problem with such systems is that when the consumer goes outside the work area, the system is unable to provide the specified accuracy of coordinate determinations. As a solution to this problem, it is possible to propose the provision of “seamless” navigation using the integration of LNS with the receiver global navigation satellite system (GNSS). It should be noted that there are very few existing solutions and they do not affect the hardware part of the devices, but work with ready-made measurements from GNSS receiver and LNS. The method of synchronization of GNSS receiver time scales and the reference radio-navigation point of the local navigation system was developed in this paper. The authors have synthesized an algorithm for estimation of time scale offset. The proposed method of scale

synchronization allows to provide “seamless” navigation and joint processing of measurements of the LNS radio navigation reference point and GNSS receiver.

Keywords: local navigation systems, LNS, global navigation satellite system, GNSS, GNSS receiver, time scale synchronization.

For citation: Evseev A.D., Orobchenko S.V., Chugunov A.A., Kochka K.V., Malyshev A.P., Chernykh S.V. (2025) Synthesis of an algorithm for synchronization of time scales of local navigation system using ultra-wideband signals and global navigation satellite system. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management.* No. 2. Pp. 94 – 103. DOI: 10.18137/RNU.V9187.25.02.P.94 (In Russian).

Введение

Для навигации объектов на Земле и околоземном пространстве фактическим стандартом на сегодняшний день являются глобальные спутниковые навигационные системы (далее – ГНСС) [1; 2]. Глобальность данных систем заключается в возможности определения координат объектов в любой точке земли в любой момент времени. Однако сигналы ГНСС имеют ряд недостатков: недоступность в помещениях, под землей, в тоннелях, ограниченность их приема в условиях плотной городской застройки, а также в зонах, где присутствуют помехи.

Для решения задач позиционирования объектов в областях, где ГНСС не обеспечивают требуемую точность координатных определений потребителя, применяются локальные навигационные системы (далее – ЛНС) [3–5]. Наиболее эффективными являются ЛНС, реализующие позиционный метод навигации. К достоинствам данного метода можно отнести высокую точность определения координат потребителя. Данная ЛНС характеризуется необходимостью развертывания и поддержания инфраструктуры опорных радионавигационных точек (далее – ОРНТ), что возможно в большинстве практических случаев. Также распространены корреляционно-экстремальные (обзорно-сравнительные) ЛНС [6; 7] и навигационная аппаратура потребителей, реализующая метод счисления пути (инерциальная, одометрическая, визуально-одометрическая). Известны их гибриды, такие как SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Позиционные ЛНС на сегодняшний день решают ряд практических задач: мониторинг сотрудников на предприятиях, навигация сервисных и промышленных роботов на производстве, координатное обеспечение роботизированных самоходных тележек на автоматизированных складах, навигация людей в общественных местах (торговых центрах, аэропортах, вокзалах, музеях), трекинг движения тела человека для задач спортивной аналитики, восстановления после травм, игровой индустрии.

В настоящее время набирают популярность позиционные ЛНС, использующие сверхширокополосные сигналы (далее – СШП) стандарта IEEE 802.15.4 [8; 9]. Данный стандарт беспроводной связи характеризуется низким энергопотреблением аппаратуры. Навигационные системы, которые построены на базе технологии СШП, обеспечивают погрешность определения координат объектов в закрытых пространствах от нескольких сантиметров до метра в зависимости от конфигурации.

Если потребитель выходит за пределы рабочей зоны ЛНС, система не способна обеспечить заданную точность координатных определений. В качестве решения данной проблемы можно предложить обеспечение бесшовной навигации, использующей совместную обработку измерений устройства, использующего СШП-радиосигналы (в дальнейшем для кра-

Синтез алгоритма синхронизации шкал времени локальной навигационной
системы, использующей сверхширокополосные сигналы...

ткости будет использоваться СШП-устройство), с другими навигационными системами, например, с навигационной аппаратурой потребителя (далее – НАП) ГНСС. На сегодняшний день интеграция таких систем в сложных условиях становится актуальной и востребованной задачей. Стоит отметить, что существующих решений очень мало и они не затрагивают аппаратную часть приборов, а работают с уже готовыми измерениями радионавигационных параметров от ГНСС и СШП-устройств с последующей обработкой [10; 11]. Для перехода к совместной обработке измерений сигналов ГНСС и СШП-устройства предлагаются синхронизировать шкалы времени (далее – ШВ) этих систем. При решении задач координатно-временного обеспечения потребителя зачастую возникает необходимость определения одного и того же момента времени в разных ШВ. Разумеется, чаще возникает задача фиксации моментов времени измерений СШП-устройства в шкале времени ГНСС.

Постановка задачи

Пусть имеется ГНСС-приемник и СШП-устройство с некоторым количеством ОРНТ. Измерения радионавигационных параметров в ГНСС приемнике и в СШП-устройстве происходят в разные моменты времени. Эти моменты времени фиксируются в собственных, не связанных между собой шкалах времени этих приборов. Примем, что для синхронизации двух шкал времени между собой необходимо зафиксировать какое-то одно событие в обеих шкалах. Практически в каждом приемнике ГНСС формируется сигнал PPS (Pulse per second) и оцифровка момента времени этого импульса в шкале времени ГНСС (T_k^{GNSS}). Необходимо принять сигнал PPS в СШП-устройстве и зафиксировать момент появления этого сигнала в шкале времени СШП-устройства (T_k^{SPP}). Разность между T_k^{GNSS} и T_k^{SPP} будет служить оценкой разности и связью шкал времени НАП ГНСС и СШП-устройства на момент времени T_k^{GNSS} .

Оценка смещения шкалы времени СШП-устройства

Величина смещения шкалы времени СШП-устройства относительно ГНСС-приемника непостоянна и требует оценки в каждый момент времени приема PPS. Оценка смещения ШВ и события, которые происходят в устройстве, использующем СШП-радиосигналы, происходят принципиально не одновременно. Для обеспечения синхронизации требуется пересчитывать оценки моментов времени этих событий, происходящих в СШП-устройстве, из собственной ШВ в ШВ ГНСС-приемника. Для этого должна обеспечиваться возможность экстраполяции и предсказания смещения ШВ. Поставим задачу оценки смещения шкал времени СШП-устройства и ГНСС-приемника и скорости этого смещения. Данную задачу удобно решать с помощью линейного фильтра Калмана.

Вектор состояния включает в себя смещение ШВ и его скорость:

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \Delta_k \\ \dot{\Delta}_k \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Модель наблюдений:

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k, \quad (2)$$

где $\mathbf{H} = [1 \ 0]$, \mathbf{n}_k – дискретный белый гауссов шум наблюдения с дисперсией \mathbf{D}_n .

Наблюдениями фильтра на каждом такте синхронизации является скалярная величина

$$y_k = T_k^{ГНСС} - T_k^{СШП}. \quad (3)$$

Алгоритм линейного фильтра Калмана

1. Шаг экстраполяции – вычисление экстраполированной оценки вектора состояния и матрицы дисперсий ошибок экстраполированной оценки:

$$\tilde{x}_k = \mathbf{F}\hat{x}_{k-1}; \quad (4)$$

$$\tilde{D}_{x,k} = \mathbf{F}D_{x,k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{G}D_{\xi}\mathbf{G}^T, \quad (5)$$

где ξ_{k-1} – матрица дисперсий формирующего дискретного белого гауссова шума;

\mathbf{F} и \mathbf{G} – матрицы собственной динамики и формирующего шума соответственно:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & dT \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ dT \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где dT – интервал времени между соседними отсчетами.

2. Вычисление коэффициентов фильтра:

$$\mathbf{K}_k = \tilde{D}_{x,k} \mathbf{H}^T \left(\mathbf{H} \tilde{D}_{x,k} \mathbf{H}^T + \mathbf{D}_n \right)^{-1}. \quad (7)$$

3. Шаг оценки – вычисление оценки вектора состояния, информативных параметров и матрицы дисперсии ошибок оценки:

$$\mathbf{D}_{x,k} = \tilde{D}_{x,k} - \mathbf{K}_k \mathbf{H} \tilde{D}_{x,k}; \quad (8)$$

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + \mathbf{K}_k (y_k - \mathbf{H}\tilde{x}_k). \quad (9)$$

Метод синхронизации СШП-устройства и ГНСС-приемника

Для решения поставленной задачи используется экспериментальная установка, состоящая из следующих модулей:

- СШП-устройство;
- ГНСС-приемник;
- персональный компьютер (далее – ПК).

СШП-устройство оснащено приемопередатчиком DW1000 от компании DecaWave (QORVO)¹, микроконтроллером (МК) STM 32F429ZIT6 и устройствами ввода/вывода (USB, Ethernet). Применяемый приемопередатчик DW-1000 имеет встроенный таймер, который позволяет сохранять метку времени с пикосекундным разрешением.

ГНСС-приемник SinoGNSSK803² также имеет USB-выход для подключения к ПК и выход PPS. Полная схема экспериментальной установки представлена на Рисунке 1.

¹ DecaWave : Official website. URL: <https://www.decawave.com/> (дата обращения: 05.02.2024).

² ComNav Technology : Official website. URL: <https://www.comnavtech.com/> (дата обращения: 05.02.2024).

Синтез алгоритма синхронизации шкал времени локальной навигационной системы, использующей сверхширокополосные сигналы...

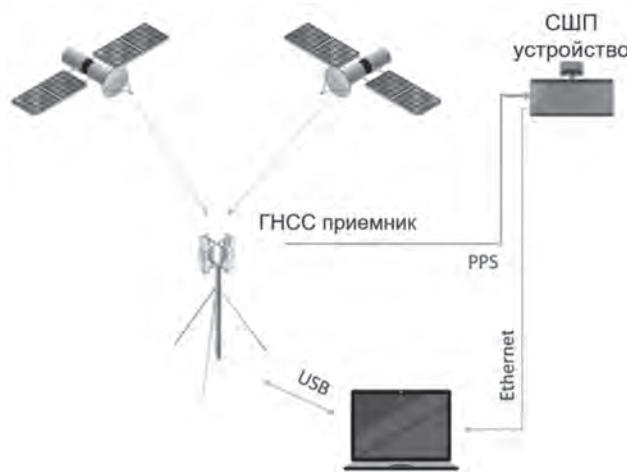


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для синхронизации временных шкал ГНСС-приемника и СШП-устройства

Источник: здесь и далее рисунки выполнены авторами.

Для синхронизации шкалы времени ГНСС-приемника $t^{\text{ГНСС}}$ и шкалы времени СШП-устройства $t^{\text{ЛНС}}$ используется следующий метод (временная диаграмма представлена на Рисунке 2).

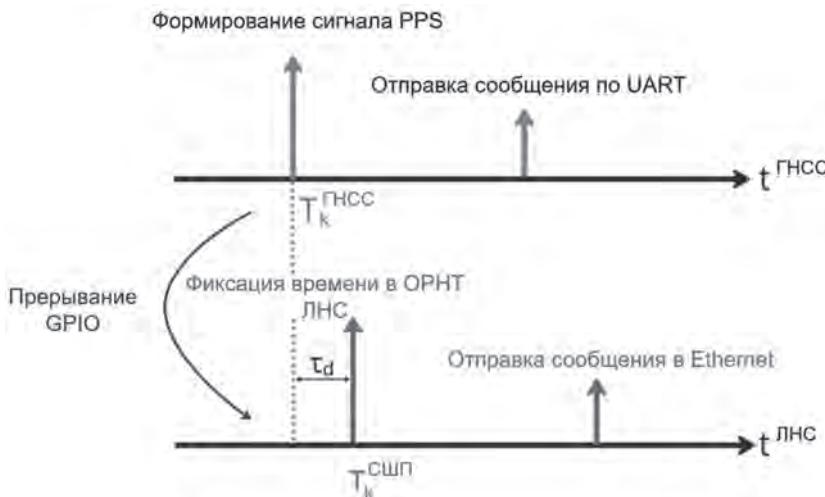


Рисунок 2. Временная диаграмма синхронизации СШП устройства и приемника ГНСС

Выход PPS ГНСС-приемника подключен к одному из контактов GPIO микроконтроллера STM32 СШП-устройства. Этот контакт GPIO сконфигурирован как вход. Каждый раз, когда на него приходит импульс PPS (положительный перепад каждую секунду), по нарастанию импульса срабатывает прерывание текущего процесса микроконтроллера.

В функции обработки прерывания фиксируется время импульса $T_k^{СШП}$ (k – номер момента времени) в шкале времени СШП-устройства. Затем зафиксированное время передается в ПК через Ethernet и сохраняется.

Когда ГНСС-приемник формирует PPS, в нем фиксируется момент времени этого события в шкале времени приемника $T_k^{ГНСС}$. Оцифровка этого момента времени передается в ПК через интерфейс UART и сохраняется. В итоге на ПК формируется файл, содержащий оцифровки события PPS в шкалах времени СШП-устройства ($T_k^{СШП}$) и ГНСС-приемника ($T_k^{ГНСС}$). Момент времени $T_k^{СШП}$ соответствует времени события PPS с погрешностью τ_d , вызванной задержками в передаче PPS до контакта GPIO и задержкой обработки прерывания на МК STM32.

Результаты эксперимента

Для проверки разработанного метода синхронизации был проведен эксперимент длительностью 1 час. В течение эксперимента сохранялись моменты времени события PPS в шкалах времени СШП-устройства (T_k^{UWB}) и ГНСС-приемника (T_k^{GNSS}). На Рисунках 3, 4 представлены разности шкал времени ГНСС-приемника и СШП-устройства и производная этой разности (дрейф) соответственно.

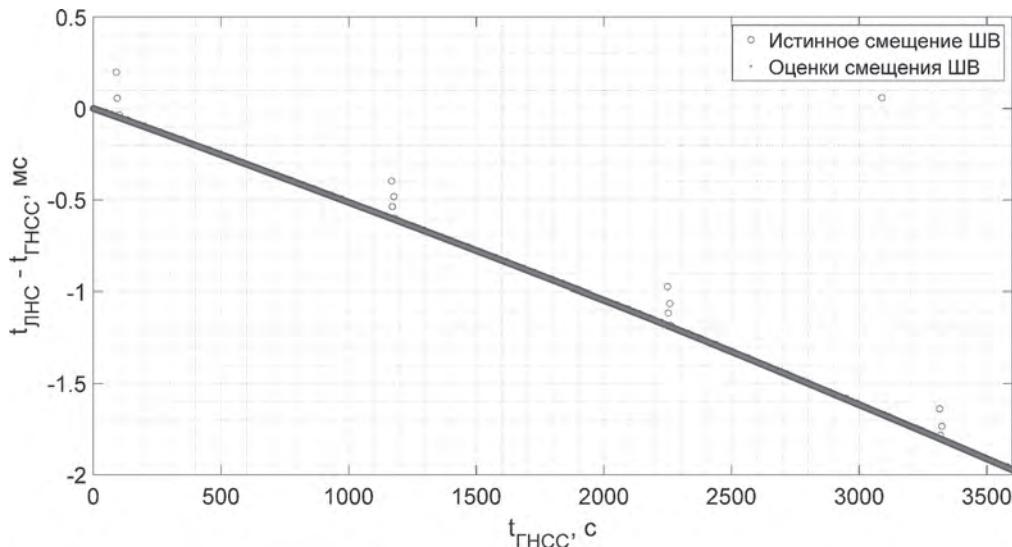


Рисунок 3. Разности ШВ ГНСС-приемника и ШВ СШП-устройства

Синтез алгоритма синхронизации шкал времени локальной навигационной системы, использующей сверхширокополосные сигналы...

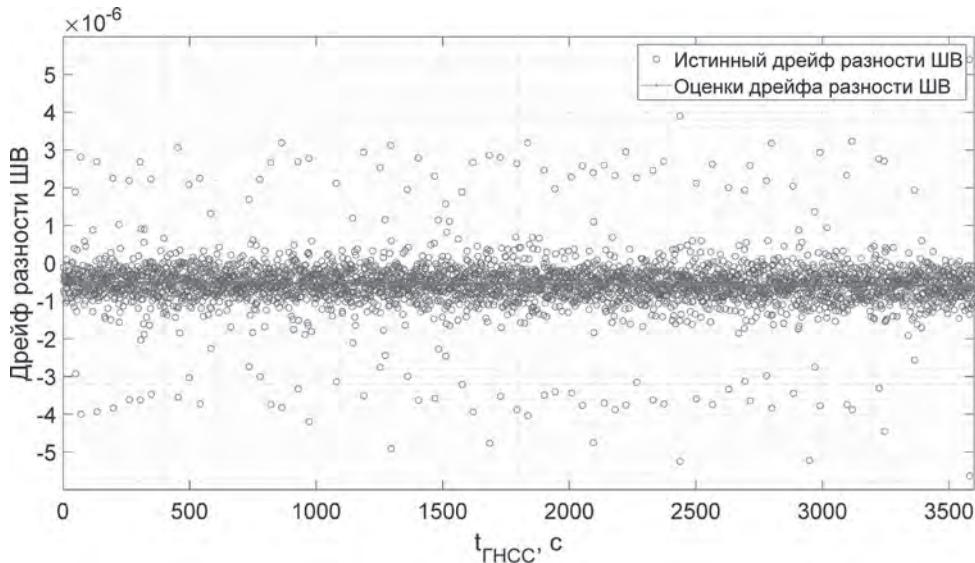


Рисунок 4. Дрейф ШВ ГНСС-приемника и ШВ ССП-устройства

Как можно заметить по Рисунку 3, на рассматриваемых интервалах времени можно принять, что смещение шкал линейное, следовательно, это смещение можно экстраполировать и предсказывать.

**Оценка значений моментов времени событий ССП-устройства
в ШВ ГНСС-приемника**

Для расчета момента времени событий ССП-устройства в ШВ-приемника ГНСС необходимо произвести следующий расчет:

$$T_c^{GNCC} = T_c^{SPW} - \left[\Delta_k + \dot{\Delta}_k (T_c^{SPW} - T_k^{SPW}) \right], \quad (10)$$

где T_c^{GNCC} – значение момента времени события, которое произошло в ССП-устройстве в ШВ ГНСС-приемника; T_c^{SPW} – значение момента времени события ССП-устройства в собственной ШВ; T_k^{SPW} – значение последнего момента времени в ШВ ССП-устройства, на котором произошел последний шаг фильтра Калмана (расчет текущих значений Δ_k и $\dot{\Delta}_k$).

Заключение

В данной статье представлен метод синхронизации временных шкал локальной и глобальной навигационной системы. Отличительной особенностью разработанного метода является аппаратная связь ГНСС-приемника и ССП-устройства, что обеспечивает их высокоточную синхронизацию.

В данном методе синхронизации присутствует систематическая погрешность, обусловленная задержкой распространения PPS и аппаратной задержкой микроконтроллера.

Установлен квазилинейный характер ухода разности двух ШВ, что позволяет оценить как смещение, так и скорость нарастания смещения, и использовать эти величины для пересчета событий СШП-устройства в шкалу времени ГНСС-приемника.

Оценен дрейф разности шкал времени СШП-устройства и ГНСС-приемника.

Литература

1. Бакит'ко Р.В., Дворкин В.В., Карутин С.Н. и др. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития / Под ред. А.И. Перова. М. : Радиотехника, 2020. 1068 с. ISBN 978-5-93108-198-4.
2. Богданов М.Р. Применения GPS-ГЛОНАСС. Долгопрудный : Интеллект, 2012. 134 с. ISBN 978-5-91559-109-62012.
3. Kulikov R., Chugunov A., Pudlovskiy V., Tsaregorodtsev D. Weighted Pseudo-Range Method of Positioning in Local Ultra-Wide Band Navigation Systems // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, Russia, April 25–26, 2019. Pp. 387–390. DOI: 10.1109/USBEREIT.2019.8736586
4. Chugunov A., Petukhov N., Kulikov R. ToA Positioning Algorithm for TDoA System Architecture // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russia, September 06–12, 2020. Pp. 871–876. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208169
5. Chai W, Chen C., Edwan E., Zhang J., Loffeld O. INS/Wi-Fi based indoor navigation using adaptive Kalman filtering and vehicle constraints // 2012 9th Workshop on Positioning, Navigation and Communication. Dresden, Germany, March 15–16, 2012. Pp. 36–41. DOI: 10.1109/WPNC.2012.6268735
6. Mukhina M. Particle filtering in complex correlation-extremal navigation // 2014 IEEE 3rd International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). Kiev, Ukraine, October 14–17, 2014. Pp. 44–48. DOI: 10.1109/MSNMC.2014.6979727
7. Pachedjieva B.K. Comparison of the Time Mutability and the Correlation-Extremal Methods for Stochastic Objects Drift Velocity Measurements // 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET). Sozopol, Bulgaria, September 12–14, 2019. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ET.2019.8878645
8. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: LowRate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) // IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802154-2006). 2011. P. 1–314. DOI: 10.1109/IEEEESTD.2011.6012487
9. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks // IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802154-2015). 2020. P. 1–800.
10. Jiang W, Cao Z, Cai B, Li B, Wang J. Indoor and Outdoor Seamless Positioning Method Using UWB Enhanced Multi-Sensor Tightly-Coupled Integration // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021. Vol. 70. No. 10. Pp. 10633–10645. DOI: 10.1109/TVT.2021.3110325
11. MacGougan G., O'Keefe K., Klukas R. Tightly-coupled GPS/UWB Integration // Journal of Navigation. 2010. Vol. 63. No. 1. Pp. 1–22. DOI: 10.1017/S0373463309990257

References

1. Bakit'ko R.V., Dvorkin V.V., Karutin S.N., et al. (2020) *GLONASS. Modernizatsiya i perspektivy razvitiya* [GLONASS. Modernization and development prospects]. Moscow : Radiotekhnika Publ. 1068 p. ISBN 978-5-93108-198-4. (In Russian).

Синтез алгоритма синхронизации шкал времени локальной навигационной системы, использующей сверхширокополосные сигналы...

2. Bogdanov M.R. (2012) *Primeneniya GPS-GLONASS* [Application of GPS-GLONASS]. Dolgoprudnyi : Intellekt Publ. 134 p. ISBN 978-5-91559-109-62012. (In Russian).
3. Kulikov R., Chugunov A., Pudlovskiy V., Tsaregorodtsev D. (2019) Weighted Pseudo-Range Method of Positioning in Local Ultra-Wide Band Navigation Systems. In: *2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, Russia, April 25–26, 2019. Pp. 387–390. DOI: 10.1109/USBEREIT.2019.8736586
4. Chugunov A., Petukhov N., Kulikov R. (2020) ToA Positioning Algorithm for TDoA System Architecture. In: *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, Russia, September, 06–12 2020. Pp. 871–876. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208169
5. Chai W., Chen C., Edwan E., Zhang J., Loffeld O. (2012) INS/Wi-Fi based indoor navigation using adaptive Kalman filtering and vehicle constraints. In: *2012 9th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*. Dresden, Germany, March 15–16, 2012. Pp. 36–41. DOI: 10.1109/WPNC.2012.6268735
6. Mukhina M. (2014) Particle filtering in complex correlation-extremal navigation. In: *2014 IEEE 3rd International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. Kiev, Ukraine, October 14–17, 2014. Pp. 44–48. DOI: 10.1109/MSNMC.2014.6979727
7. Pachedjieva B.K. (2019) Comparison of the Time Mutability and the Correlation-Extremal Methods for Stochastic Objects Drift Velocity Measurements. In: *2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET)*. Sozopol, Bulgaria, September 12–14, 2019. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ET.2019.8878645
8. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: LowRate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). In: IEEE Std 802.15.4- 2011 Revis. IEEE Std 802.15.4-2006. 2011. P. 1–314.
9. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. In: IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015). 2020. P. 1–800.
10. Jiang W., Cao Z., Cai B., Li B., Wang J. (2021) Indoor and Outdoor Seamless Positioning Method Using UWB Enhanced Multi-Sensor Tightly-Coupled Integration. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021. Vol. 70. No. 10. Pp. 10633–10645. DOI: 10.1109/TVT.2021.3110325
11. MacGougan G., O’Keefe K., Klukas R. (2010) Tightly-coupled GPS/UWB Integration. *Journal of Navigation*. Vol. 63. No. 1. Pp. 1–22. DOI: 10.1017/S0373463309990257

Поступила в редакцию: 13.03.2025

Received: 13.03.2025

Поступила после рецензирования: 18.05.2025

Revised: 18.05.2025

Принята к публикации: 02.06.2025

Accepted: 02.06.2025