

УДК 621.396.9

СИНХРОНИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ В ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННОЙ АППАРАТУРЕ С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ (ГНСС)

Чернов Денис Алексеевич

аспирант кафедры проектирования и производства электронно-вычислительных систем ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет».

E-mail: evsxx1@gmail.com.

Адрес: 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3.

Аннотация: Описаны факторы, влияющие на точность синхронизации времени с помощью сигналов ГНСС и способы устранения влияния данных факторов. Предложен способ синхронизации опорного генератора для систем синхронизации времени на основе измерения доплеровского сдвига частоты сигналов ГНСС. Приведен математический аппарат, который можно использовать в навигационных процессорах для расчета управляющего напряжения на генератор, управляемый напряжением. Предложена структурная схема приемника сигналов от спутников навигационных систем для систем синхронизации времени на основе навигационного процессора M8030 U-blox. В графическом представлении показаны характеристики точности времени, частоты системы синхронизации времени построенной по предложенной структуре. Данные представлены для нескольких режимов работы устройства: с сообщением о компенсации ошибки и без сообщения о компенсации ошибки.

Ключевые слова: системы синхронизации времени, ГНСС, синхронизация опорного генератора, измерения доплеровского сдвига частоты.

Введение

Системы синхронизации времени имеют важное значение в системах связи, радиолокации и телекоммуникаций. Развитие подобных систем связано с развитием микроэлектронной техники, компьютерных систем и методов генерирования синхриимпульсов.

В структуре большинства телекоммуникационных систем присутствует синтезатор частот, который формирует частоты с помощью опорного генератора.

В настоящее время существует несколько способов генерирования опорной частоты.

Во-первых, с помощью кварцевых резонаторов, которые формируют частоту с помощью механического колебания кристалла. Стабильность генерирования частоты в таких устройствах зависит от формы, размера и температуры кристалла. Идентичное исполнение кристаллов нескольких резонаторов невозможно, поэтому невозможно добиться высокой стабильности частоты нескольких резонаторов. Кроме того на стабильность частоты кварцевого резонатора оказывает влияние температура кристалла. Для устранения воздействия темпе-

ратуры на формирование частоты приходится вводить системы компенсации или стабилизации.

Во-вторых, с помощью атомных стандартов частоты, которые используют в своей работе собственные колебания атомов элементов. Данный способ позволяет производить высокостабильные генераторы опорной частоты, которые используются в космической отрасли.

Однако подобные устройства обладают высокой стоимостью реализации.

В-третьих, использование сигналов ГНСС для синхронизации генераторов.

Сигналы ГНСС позволяют определить местоположение, скорость и точное время. Существует большое количество приемников сигналов ГНСС, которые формируют сигналы точного времени по формату секундной метки (1 PPS), что позволяет синхронизировать передачу сообщений между передатчиком и приемником, но не позволяет контролировать процесс приема и передачи сообщений, что бывает необходимо для исследования среды, в которой передается информация.

В настоящее время приемники сигналов ГНСС формируют 1PPS с точностью 10-100 нс и являются законченными устройствами для временной синхронизации, что позволяет организовать недорогое устройство системы синхронизации времени.

Однако современное состояние микроэлектронной промышленности и развитие методов анализа сигналов позволяют организовать приемники со стабильной генерацией опорной частоты

Цель работы: представить структурную схему приемника сигналов ГНСС с синхронизацией опорного генератора от сигналов ГНСС и возможностью генерирования сигналов опорной частоты.

1. Синхронизация опорного генератора в приемнике ГНСС

Прежде чем рассматривать способы синхронизации опорного генератора в приемнике ГНСС, необходимо рассмотреть составляющие, которые влияют на точность поддержания опорной частоты. На нее оказывают влияние три фактора:

1. Постоянная задержка, вызванная распространением сигнала по кабелю от антенны в приемник и внутри приемника;

2. Ошибка, вызванная частотой генерации импульсов, которая зависит от времени квантования системы;

3. Возможность многолучевого распространения сигнала [1].

Влияние первой составляющей можно удалить с помощью учета времени задержки, которое можно хранить в памяти приемника. Вторую составляющую возможно компенсировать при использовании специальных форматов сообщения по типу UBХ-TIM-TR.

Влияние третьей составляющей может быть учтено с помощью дополнительных алгоритмов обработки многолучевых сигналов или с использованием антенны со специальной узкой диаграммой направленности [1].

Синхронизация опорного генератора частоты с помощью измерения доплеровского сдвига частоты

Скорость движения приемника ГНСС может быть рассчитана как первая производная расстояния и вычисляется по формуле (1) [2,6,8].

$$\frac{\partial R_i}{\partial t} = \frac{(\Delta x_i) \left(\frac{\partial x_{ci}}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial t} \right) + (\Delta y_i) \left(\frac{\partial y_{ci}}{\partial t} - \frac{\partial y}{\partial t} \right) + (\Delta z_i) \left(\frac{\partial z_{ci}}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial t} \right)}{R_i} + c \frac{\partial \Delta t}{\partial t} \quad (1)$$

где $\frac{d\Delta t}{dt}$ характеризует скорость отстройки

опорной шкалы потребителя от системной шкалы. При условии, что опорный генератор системы имеет высокую стабильность (до 10^{-13}) [5], данная величина определяется отстройкой и нестабильностью опорного генератора приемника. Левая часть уравнения (1) пропорциональна скорости движения спутника и зависит от доплеровского смещения частоты. С учетом этого формулу 1 можно переписать в виде

$$\frac{F_{d,i}c}{F_{n,i}} = \frac{(\Delta x_i) \left(\frac{\partial x_{ci}}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial t} \right) + (\Delta y_i) \left(\frac{\partial y_{ci}}{\partial t} - \frac{\partial y}{\partial t} \right) + (\Delta z_i) \left(\frac{\partial z_{ci}}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial t} \right)}{R_i} + c \frac{\partial \Delta t}{\partial t}, \quad (2)$$

где $F_{d,i}$ - доплеровский сдвиг частоты i -го навигационного спутника, $F_{n,i}$ - номинальное значение несущей частоты i -го навигационного спутника.

Если потребитель не движется, то уравнение (2) можно преобразовать к виду (3)

$$\frac{F_{d,i}c}{F_{n,i}} = \frac{\Delta x_i \frac{\partial x_{ci}}{\partial t} + \Delta y_i \frac{\partial y_{ci}}{\partial t} + \Delta z_i \frac{\partial z_{ci}}{\partial t}}{R_i} + c \frac{\partial \Delta t}{\partial t}. \quad (3)$$

Тогда отклонение опорного генератора равняется (4) [2]

$$\frac{\partial \Delta t}{\partial t} = \left(\frac{\Delta x_i \frac{\partial x_{ci}}{\partial t} + \Delta y_i \frac{\partial y_{ci}}{\partial t} + \Delta z_i \frac{\partial z_{ci}}{\partial t}}{R_i} - \frac{F_{d,i}c}{F_{n,i}} \right) c^{-1}. \quad (4)$$

Заменим $\frac{d\Delta t}{dt}$ на ΔF и запишем (4) для нескольких спутников

$$\Delta F = \frac{1}{cn} \left(\sum_{i=n}^n \left(\frac{\Delta x_i \frac{\partial x_{ci}}{\partial t} + \Delta y_i \frac{\partial y_{ci}}{\partial t} + \Delta z_i \frac{\partial z_{ci}}{\partial t}}{R_i} \right) - \sum_{i=1}^n \frac{F_{d,i}c}{F_{n,i}} \right). \quad (5)$$

Опорные генераторы на борту навигационных спутников характеризуются собственной нестабильностью, информация о которой передается в навигационном сообщении и определяется (6)

$$y_i = \frac{F_{n,i} - f_n}{f_n}. \quad (6)$$

здесь y_i - относительное отклонение прогнозируемого значения несущей частоты излучаемого радиосигнала i - го спутника от номинального значения; f_n - номинальное значение несущей частоты радиосигнала i - го спутника.

Выражение для расчета номинальной частоты радиосигнала корректируется в соответствии с выражением (7):

$$f_n = \frac{F_{n,i}}{1 + y_i} \quad (7)$$

С учетом (7) выражение (5) преобразуется к виду

$$\Delta F = \frac{1}{cn} \left(\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta x_i \frac{\partial x_{ci}}{\partial t} + \Delta y_i \frac{\partial y_{ci}}{\partial t} + \Delta z_i \frac{\partial z_{ci}}{\partial t})}{R_i} - \sum_{i=1}^n \frac{(1 + \gamma_i) F_{d,i} c}{F_{n,i}} \right) \quad (8)$$

2. Структурная схема приемника ГНСС с высокостабильным частотным выходом

Для реализации подобного устройства необходим навигационный процессор, который способен принимать сигналы ГНСС и имеет возможность подключения управляемого напряжением термокомпенсированного генератора.

На рис. 1 изображена структурная схема приемника с высокостабильным частотным выходом Timerpulse 2, который можно сконфигурировать на частоту 1-10 МГц. Кроме него ССВ генерирует сигналы секундной метки на выходе Timerpulse 1.

Для организации работы устройства к навигационному процессору необходимо присоединить блок фильтрации и усиления при-

маемого антенной сигнала (Фильтр и У), организовать систему питания устройства, присоединить внешнюю flash-память для работы с внешним исполняемым кодом, присоединить термокомпенсированный генератор, управляемый напряжением (ГУН), кварцевый генератор для часов реального времени. Последний элемент не является обязательным условием для работы устройства, сигналы для блока реального времени можно получать и с ГУНа [3,9,10].

Остальные блоки цифровой фильтр, коррелятор, оперативная память, интерфейсы связи организованы на кристалле UBХ-M8030.

3. Анализ работы устройства

Конфигурация импульсов временной метки зависит от приложения. Чем меньше частота следования импульсов, тем выше точность установки частоты. Для определения точности следования импульсов необходимо использовать высокие стандарты частоты. С этой целью выбран рубидиевый эталон частоты.

Рис. 2 и рис. 3 показывает точность U-Blox 1PPS без компенсации и с сообщением о компенсации. Данные измерения проводились в течение 2 часов с интервалом 1 секунды.

Обратите внимание, что точность также может быть определена в терминах значения СКО, которое также может быть рассчитано с использованием вышеупомянутой статистики. В целом документация производителя говорит

о СКО в 30 нс при отсутствии компенсации и 15 нс при использовании сообщения о компенсации.

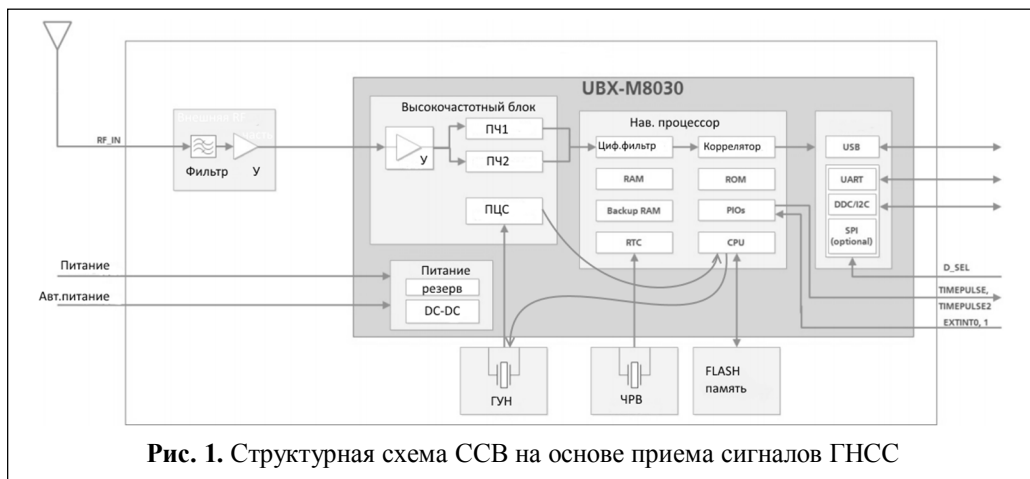


Рис. 1. Структурная схема ССВ на основе приема сигналов ГНСС

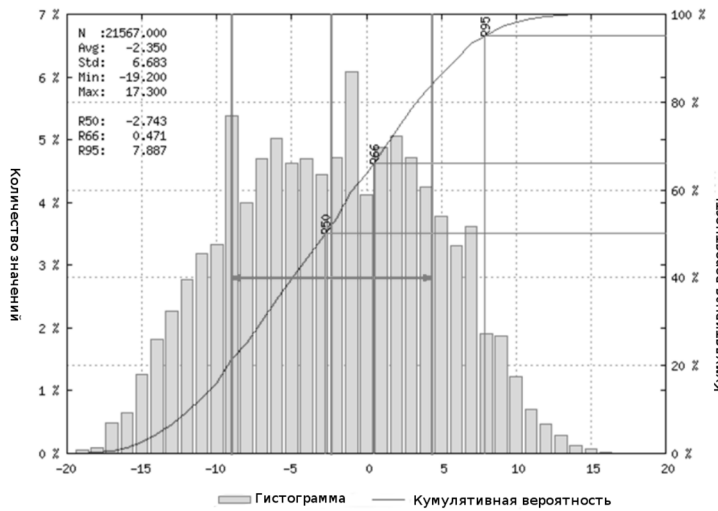


Рис. 2. Выборка точности без сообщения о компенсации

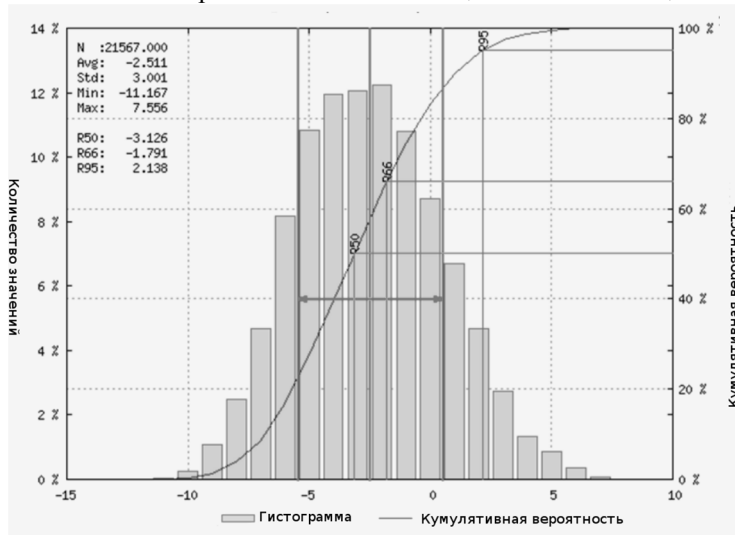


Рис. 3. Выборка точности с сообщения о компенсации

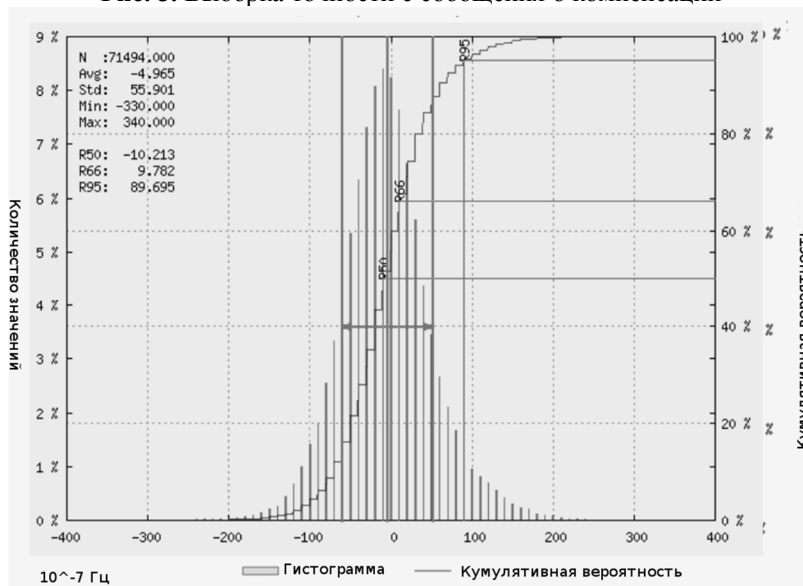


Рис. 4. Точность поддержания частоты

Отличия обусловлены тем, что точность расчета зависит от созвездия спутников. Это сказывается на точности определения времени. Читая сообщения UBX-NAV-DOP, можно определить качество получаемого решения [4,7].

Теперь рассмотрим точность работы выхода Timerpulse 2.

В пределах выходных частот 1-10 МГц точность рассчитывается в два этапа. В начале рассчитывается разница с опорной частотой как показано на рис. 4 (фиолетовые линии). Затем среднее значение делится на опорную частоту, в данном случае 8 МГц, что дает нам $6.2 \cdot 10^{-11}$.

Стабильность частоты зависит от времени наблюдения и измеряется в терминах девиации Аллана или фазового шума.

Временные характеристики стабильности устройства показывают отличную долговременную стабильность и разумную кратковременную стабильность, но оно не предназначено для улучшения характеристик фазы при работе с высокими шумами.

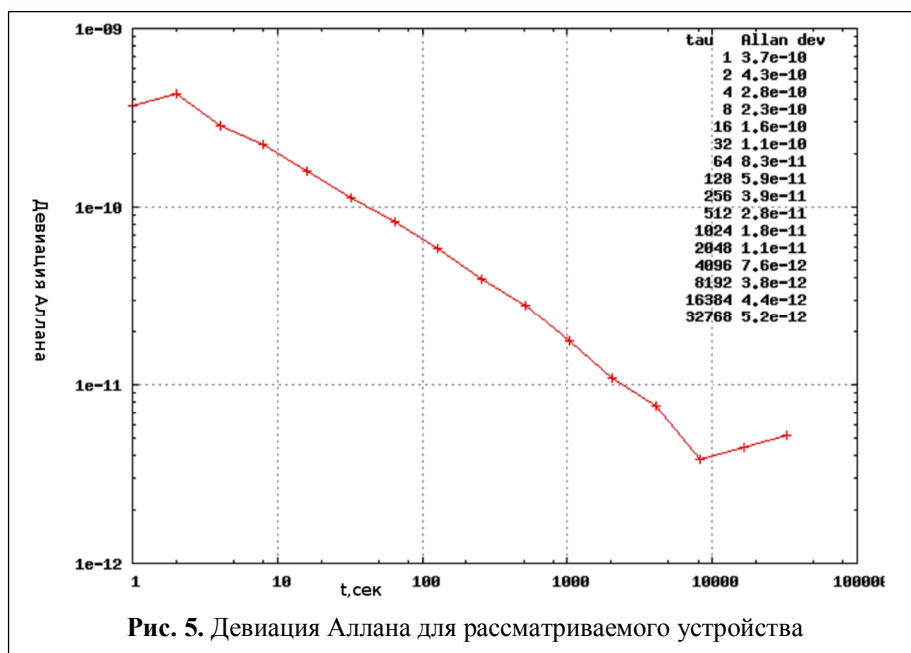


Рис. 5. Девиация Аллана для рассматриваемого устройства

Девиация Аллана обычно измеряется для интервалов наблюдения от 1 с до 1000 с или больше. Она также известна как квадрат СКДО (среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение) частоты.

В этом случае девиация Аллана обеспечивает лучшие результаты, чем стандартное отклонение, рассчитанное из набора данных. Кривая девиации показана на рис. 5. Интервал наблюдения около 1 сек относится к краткосрочной стабильности и интервалы выше нескольких секунд относятся к долгосрочной устойчивости.

Из-за дробного использования частот девиация Аллана показывает график зависимости от интервала наблюдения.

Заключение

В статье предложен способ недорогой организации системы синхронизации времени на основе использования приемника сигналов спутниковых навигационных систем, который возможно применять для широкого круга задач. Поскольку он имеет не только выход секундной метки времени, но и выход высокостабильной частоты в пределах 1-10 МГц. Синхронизация опорного генератора в таком приемнике организована с помощью измерений доплеровского сдвига частоты. В дальнейшем

планируется рассмотреть возможность синхронизации опорного генератора с помощью измерений фазы принимаемого сигнала ГНСС.

Литература

1. Рябов И.В., Чернов Д.А. Применение процессора 1892ВМ10Я для повышения точности определения координат глобальной навигационной системы. / Вестник ПГТУ – Йошкар-Ола, 2013
2. Тяпкин В.Н., Гарин Е.Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с

использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 260с.

3. Рябов И.В., Толмачев С.В., Чернов Д.А. Разработка алгоритма повышения точности местопределения в условиях городского ландшафта с использованием сигналов GPS и ГЛОНАСС // Труды конференции DSPA-2014. -2014

4. Рябов И.В., Толмачев С.В., Чернов Д.А. Выделение значимой информации из слабых сигналов навигационных систем для алгоритмов повышения точности // Труды конференции RLNC-2014. -2014

5. Лау Л., Кросс П. Новая сигнал-шум модель для высокоточных ГНСС измерений в присутствии многолучевости. // 19th интернациональная техническая встреча института навигации (ION GNSS 2006).-Техас, 2006.- с.456-471.

6. Макгоугон Г.Д. Влияние плохих условий приема на точность позиционирования GPS // In Proceedings of ION GNSS 2012.- Нешвилл, 2012, с.204-216.

7. Рябов И.В., Чернов Д.А.. Повышение точности позиционирования подвижных объектов при помощи сигналов ГНСС// Радиотехнические и телекоммуникационные системы.-,2015-№9.- с.43-53.

8. Рябов И.В., Толмачев С.В., Чернов Д.А. Цифровой вычислительный синтезатор сложных широкополосных сигналов / Приборы и техника эксперимента. - 2014. - № 4. - С. 49-54.

9. Рябов И.В., Юрьев П.М., Толмачев С.Н. Методы повышения быстродействия цифровых вычислительных синтезаторов / Радиотехника. - 2013.- № 9. - С. 44-52 .

10. Рябов И.В. Метод прямого цифрового синтеза за прецизионных сигналов / Радиотехника. - 2006. - N 9. - С. 13-16

Поступила 27 мая 2016 г.

English

Time synchronization in the spaced-apart equipment through the Global Navigation Satellite System (GNSS) signals

Denis Alekseevich Chernov – Post-graduate Student Department of Design Engineering and Technology of Electronic Devices Volga State University of Technology.

E-mail: evsxx1@gmail.com.

Address: 424000, Yoshkar-Ola, Lenin sq, 3.

Abstract: Time synchronization systems are of important significance in communication, radar detection and telecommunication systems. The structure of the most telecommunication systems has frequency synthesizer that generates frequencies via reference generator. Nowadays there are several ways of reference frequency generation. First, this can be done via quartz-crystal units which generate frequency by crystal mechanical fluctuation. Frequency generation stability in such devices depends on the crystal shape, size and temperature. One-to-one crystal reproduction of several quartz-crystal units is impossible therefore it is not possible to achieve high frequency stability of several such units. Besides crystal temperature has impact on frequency stability of quartz-crystal units. To eliminate the temperature impact on frequency generation compensation or stabilization systems need to be applied. Secondly, this can be done via atomic frequency standards which use atomic element natural oscillations in their operation. This method enabled to make highly stable reference frequency generators that are used in the space industry. However similar devices are very costly to manufacture. Thirdly, this can be done by using GNSS signals to synchronize generators. This article describes the third way of the reference generator implementation, as it is more advantageous in regard to price/quality for the most of civil telecommunication systems. To generate highly stable frequency in the output of the time synchronization system (TSS) the voltage controlled generator is used and the control voltage of which is regulated after data processing of the Doppler frequency shift in GNSS signals. The article proposes the device structure based on the M8030 U-blox navigation processor the efficiency of which is checked in the test bench. Stability values of per-second mark point and TSS output are obtained.

Key words: time synchronization systems, GNSS, reference generator synchronization, measurement of the Doppler frequency shift.

References

1. Ryabov I.V., Chernov D.A. Processor 1892VM10Ya application to improve accuracy Global Navigation System position finding. - PGU Vestnik- Yoshkar-Ola, 2013
2. Tyapkin V.N., Garin E.N. Methods of navigation parameters finding for mobile facilities using satellite radio navigation system GLONASS. - Krasnoyarsk: Sib. Fed. un-ty, 2012. - 260 p.
3. Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Chernov D. A. Algorithm development to improve position finding accuracy amidst urban landscape using GPS and GLONASS signals. - DSPA-2014 conference works.
4. Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Chernov D. A. Significant information retrieval from navigation system weak signals for accuracy improvement algorithms. - RLNC-2014 Conference Works.
5. Lau L., Cross P. New signal-to-noise model for high-precision GNSS measurements in multipath environment. - 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006). - Texas, 2006. – P. 456-471.
6. MacGougan G. D. Poor receiving conditions effect on the GPS positioning accuracy//In Proceedings of ION GNSS 2012. - Neshvil, 2012, S.204-216.
7. Ryabov I.V., Chernov D. A. Accuracy increase of mobile facilities positioning using GNSS signals. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. - 2015-№9. – P. 43-53.
8. Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Chernov D. A. Digital computing synthesizer of aggregate broadband signals. - Pribory i tekhnika eksperimenta. - 2014. - No. 4. – P. 49-54.
9. Ryabov I.V., Yuryev P.M., Tolmachev S. N. Speeding methods for digital computing synthesizers. - Radiotekhnika. - 2013. - No. 9. – P. 44-52.
10. Ryabov I.V. Direct digital synthesis method of precision signals. - Radiotekhnika. - 2006. - N 9. – P. 13-16.