

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

*Л.М. Курочкин, М.А. Курочкин, С.Г. Попов, М.В. Попов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Система навигации автономного мобильного объекта и точность навигационных данных играют ключевую роль при решении задач автономного управления мобильными объектами: планирование маршрута; управление параметрами движения; организация группового взаимодействия. Решение указанных задач требует высокой точности навигационных данных. Точность навигационных данных, получаемых от различных спутниковых систем, постоянно изменяется. Использование дифференциальных поправок для повышения точности навигационных данных в произвольной географической точке возможно не всегда из-за удалённости опорных станций и отсутствия надёжных каналов передачи дифференциальных поправок. Оперативная обработка/фильтрация навигационных данных на стороне автономного устройства часто невозможна ввиду ограничений доступных вычислительных мощностей. Оперативный выбор системы спутникового позиционирования или их комбинации, обеспечивающей наиболее точное позиционирование, является актуальной задачей. В статье описана методика, позволяющая осуществить оперативный выбор наиболее точной системы спутникового позиционирования или их комбинаций. Выбор осуществляется на основе статистического анализа данных, получаемых от систем спутникового позиционирования.

**Ключевые слова:** навигация автономных мобильных объектов; статистическая оценка навигационных данных; выбор системы спутникового позиционирования; точность навигационных данных; автономное управление.

**Ссылка при цитировании:** Курочкин Л.М., Курочкин М.А., Попов С.Г., Попов М.В. Результаты экспериментальных исследований точности позиционирования при использовании различных систем спутниковой навигации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 4. С. 79–88. DOI: 10.18721/JCSTCS.10407

## RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF POSITIONING ACCURACY USING VARIOUS SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS

*L.M. Kurochkin, M.A. Kurochkin, S.G. Popov, M.V. Popov*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

There is a constantly growing interest in tasks involving groups of autonomous mobile objects: environmental monitoring, elimination of consequences of technological disasters. A navigation system of an autonomous mobile object and the accuracy of navigation data play a key role in tasks of autonomous control of mobile objects. These tasks include: route planning, control over driving parameters of an autonomous mobile object, arrangement of interaction within a group of autonomous mobile objects. The accuracy of navigation data from satellite navigation systems essentially depends on such factors as: the number of visible satellites for any available navigation system, receiver characteristics, terrain features, environment properties. It is an important task to make a rapid choice from the available satellite navigation systems or their combination that provides the most accurate position when differential corrections are not available. This paper covers the technique that allows quick choosing of the most precise satellite navigation system or their combination. The choice is based on a statistical analysis of data received from satellite navigation systems.

**Keywords:** autonomous mobile objects navigation; navigational data statistical estimation; choice of satellite positioning system; navigation data precision; autonomous control.

**Citation:** Kurochkin L.M., Kurochkin M.A., Popov S.G., Popov M.V. Results of experimental studies of positioning accuracy using various satellite navigation systems. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2017, Vol. 10, No. 4, Pp. 79–88. DOI: 10.18721/JCSTCS.10407

### Введение

В настоящее время эксплуатируются несколько систем спутникового позиционирования: GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou. В силу влияния различных факторов точное позиционирование не всегда возможно. Точность позиционирования зависит от расположения спутников на орбите, погодных условий, особенностей рельефа, ионосферной и тропосферной рефракции [9, 10]. Результаты анализа указанных параметров предоставляются глобальной службой навигационных спутниковых систем [5].

Для снижения влияния случайной погрешности на точность определения координат используются следующие методы фильтрации: фильтр Кальмана; расширенный фильтр Кальмана, что позволяет сократить погрешность определения координат на порядок [1, 8]. Использование заранее сформированных полей точности конкретной системы навигации также позволяет значительно сократить погрешность определения координат [7].

Разработке и исследованию методов высокоточного навигационного обеспечения, учитывающего погрешности, вызванные ошибками эфемеридно-временной информации, влияния релятивистских, гравитационных и приливных эффектов,

ошибки многолучевости посвящена работа [2]. Приведённый метод позволяет достичь точности, сравнимой с точностью позиционирования, полученной с учётом RTK поправок.

Анализ навигационных данных, полученных от комбинации навигационных систем, позволяет в частных случаях получить погрешность не более 10 см, сократить время конвергенции до 70 % [3]. Анализ доступности различных спутниковых навигационных систем и точности предоставляемых ими данных в зависимости от периода наблюдения также вызывает интерес у исследователей [4].

Основной целью данного исследования является разработка методики, позволяющей осуществить оперативный выбор наиболее точной системы спутникового позиционирования или их комбинаций на основе статистического анализа данных, получаемых от этих систем.

### Критерий выбора наиболее точной системы спутникового позиционирования

При формировании управляющего воздействия, корректирующего траекторию движения мобильного объекта, необходимо использовать наиболее точные координаты объекта. Задача оптимального управления формулируется следующим образом: в фазо-

вом пространстве объекта  $X$  даны две точки  $x_n$  и  $x_k$ . Среди всех допустимых управлений  $u(t)$ , переводящих объект из точки  $x_n$  в точку  $x_k$ , найти такое, для которого критерий оптимальности  $Q(x, u) = \int_{t_0}^{t_1} G(x(t), u(t)) dt$  принимает наименьшее значение;  $x(t)$  – решение системы дифференциальных уравнений, описывающих движение управляемого объекта уравнения (с начальными условиями  $x(t_0) = x_n$ ) [7].

Для определения координат объекта (при отсутствии возможностей получения дифференциальных поправок и фильтрации полученных данных) необходимо выбрать наиболее точную систему спутникового позиционирования или их ком-

$$\min_{s1..k} \left( \sum_1^{ns} \sqrt{((x_{\text{центр}-s} - x_{ns})^2 + (y_{\text{центр}-s} - y_{ns})^2) / n_s} \right),$$

где  $s$  – система спутникового позиционирования или их комбинация;  $n_s$  – количество точек в выборке;  $x_{ns}, y_{ns}$  – координаты точки из выборки, полученной для данной системы позиционирования или их

$$\min_{s1..k} \left( \sum_1^n (d_{\text{среднее}-s} - d_i)^2 / (n_s - 1) \right), 1 \leq i \leq n_s,$$

где  $d_i$  – расстояние от точки, принадлежащей выборке, до вычисленного «эталонного» центра;  $d_{\text{среднее}-s}$  – среднее расстояние до вычисленного «эталонного» центра, полученное для данной системы позиционирования или их комбинации;  $n_s$  – количество точек в выборке.

### Выбор системы спутникового позиционирования. Эксперимент

Выбор системы спутникового позиционирования проводится по следующему алгоритму:

1. Объект прекращает движение.
2. Выбирается система спутникового позиционирования или комбинация систем.

$$d_{\text{среднее}} = \sum_1^n \sqrt{((x_{\text{центр}} - x_n)^2 + (y_{\text{центр}} - y_n)^2) / n},$$

где  $n$  – количество точек в выборке;  $x_n, y_n$  – координаты точки из выборки, и 2) диспер-

бинацию. Мобильный объект, оснащённый бюджетным одноканальным приёмником навигационных сигналов, способен самостоятельно выбрать наиболее точную систему спутникового позиционирования или комбинации таких систем из набора доступных в данной точке Земли, проанализировав данные, получаемые от систем спутникового позиционирования или их комбинаций.

Критериями выбора системы спутникового позиционирования или их комбинации являются:

- минимум среднего расстояния до «эталонного» центра (вычисленного по данным конкретной системы спутникового позиционирования или их комбинации):

комбинации;  $x_{\text{центр}-s}, y_{\text{центр}-s}$  – координаты «эталонного» центра (для данного набора точек).

- минимум дисперсии расстояний до «эталонного» центра:

3. По полученным данным определяется собственное местоположение: в течение времени  $T$  формируется набор  $n$  точек – собственных координат:  $x_i, y_i, 1 \leq i \leq n$ .

4. Для полученного набора точек вычисляется положение «эталонного» центра – точки с координатами, соответствующими среднему значению координат в выборке:

$$x_{\text{центр}} = \sum_1^n x_i / n, y_{\text{центр}} = \sum_1^n y_i / n,$$

где  $n$  – количество точек в выборке.

Вычисляются: 1) среднее евклидово расстояние от всех точек набора до вычисленного «эталонного» центра:

сия расстояний до «эталонного» центра для полученного в п. 3 набора точек:

$$D = \sum_1^n (d_{\text{среднее-}s} - d_i)^2 / (n - 1), 1 \leq i \leq n,$$

где  $d_i$  – расстояние от точки, принадлежащей выборке, до вычисленного «эталонного» центра.

5. Повторение п. 2 до тех пор, пока не будут перебраны все доступные системы и их комбинации

6. Рекомендуемой для использования системой спутникового позиционирования или комбинацией таких систем принимается, показавшая в п. 4 наименьшие среднее расстояние до центра и дисперсию.

Ключевым моментом в предложенном алгоритме становится выбор длительности интервала времени  $T$ , достаточного для оценки точности данных, получаемых от спутниковой системы или их комбинации. Выбор малого значения  $T$  может привести к некорректному выбору системы спутникового позиционирования или их комбинации; выбор излишне большого значения  $T$  может привести к устареванию полученных в п. 4. оценок, вызванного изменением положений группировок спутников, изменению состояния окружающей среды.

Для оценки длительности временного интервала, достаточного для выбора наилучшей системы спутникового позиционирования или их комбинации была проведена серия экспериментов. В каждом эксперименте использовался приёмник EVK-7 Multi-GNSS evaluation kit. Приёмник устанавливался стационарно, после чего осуществлялся выбор системы спутникового позиционирования или их комбинации, затем осуществлялось протоколирование полученных координат, в течение 15 мин. Частота получения данных от приёмника – 1 с. В экспериментах участвовали системы спутникового позиционирования GPS, Glonass, BeiDou, Galileo, QZSS, SBAS и их парные комбинации. Эксперименты проводились в Санкт-Петербурге, Мадриде (Испания), п. Рудный (Казахстан), г. Конаклы (Турция). Целесообразность территориального «разброса» мест проведения экспериментов вызвана неоднородностью покрытия Земли сигналом спутниковых навигационных

систем. Выбор интервала, превышающего 15 мин, нецелесообразен ввиду того, что оценка точности данных только шести систем спутникового позиционирования, без учёта их комбинаций, займёт 1,5 ч, что не приемлемо для задач оперативного управления, например, для управления группировкой автономных роботов.

Полученные данные обрабатывались согласно алгоритму, приведённому выше: вычислялся центр, дисперсия. Затем проводилась оценка отклонений среднего расстояния, полученных до центра, сформированного по полной пятнадцатиминутной выборке, используя наборы точек от первого измерения до  $k$ -го, где  $k$  менялось, начиная с 30, с шагом 30. То есть проводилось сравнение «эталонного» центра, полученного по пятнадцатиминутной выборке, и значений центров, полученных по выборкам длительностью 30, 60, 90, ..., 300 с; также проводилось сравнение дисперсий.

#### Анализ экспериментальных данных

Значение среднего расстояния для наборов измерений, полученных при использовании различных систем спутниковой навигации и их комбинаций, может значительно отличаться в рамках проведения одного эксперимента (серия пятнадцатиминутных измерений). Например, для измерений, проведённых в Мадриде, значение среднего расстояния до «эталонного» центра отличаются более чем в 7,5 раз (рис. 1).

Дисперсия соответствующих измерений (Galileo и GPS) отличается более чем в 97 раз (рис. 2).

Рассмотрим зависимость отклонения значений дисперсии измерений для различных выборок, размер которых изменяется с шагом 30 с (30, 60, 90, ..., 900 с). На рис. 3 представлены зависимости для систем спутникового позиционирования, показавшие наименьшие значения среднего расстояния до «эталонного» центра: GPS, GPS+QZZ, GPS+BeiDou.

Представленная диаграмма показывает, что для выборок, соответствующих временным интервалам 150 и более секунд, значе-

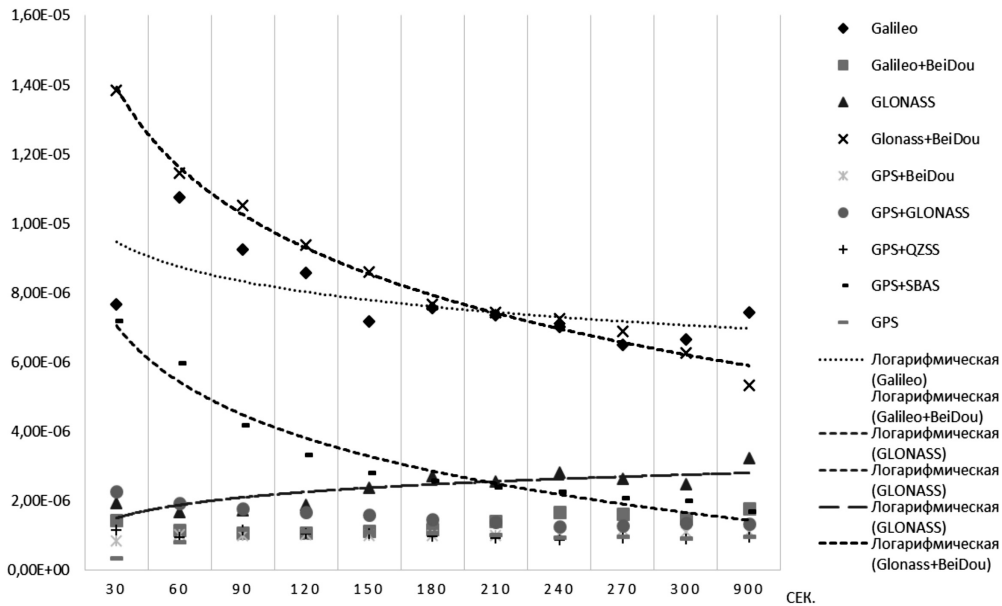


Рис. 1. Среднее расстояние до «эталонного» центра (Мадрид)

Fig. 1. The average distance to the «reference» center (Madrid)

ние вычисленной дисперсии отличается от «эталонного» не более, чем на 0,01 %.

Диаграмма, представленная на рис. 4, показывает, что для выборки, соответствующей временному интервалу 150 с и более,

значение среднего расстояния до «эталонного» центра, полученного для конкретной выборки, отличается не более, чем на 0,001 % от значения, полученного для полной выборки.

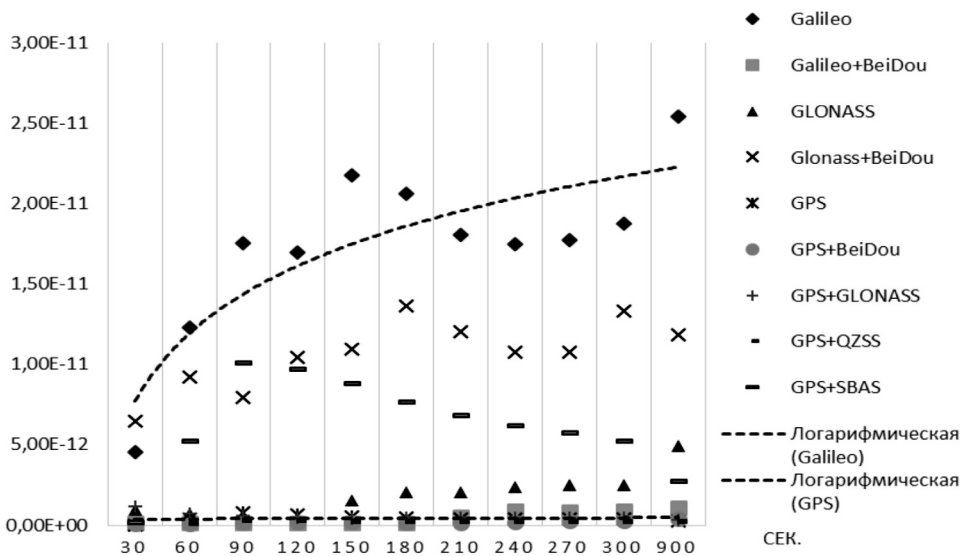


Рис. 2. Зависимость дисперсии среднего расстояния до «эталонного» центра (Мадрид) от размера выборки

Fig. 2. Dependence of the variance of the average distance to the «reference» center (Madrid) on the sample size

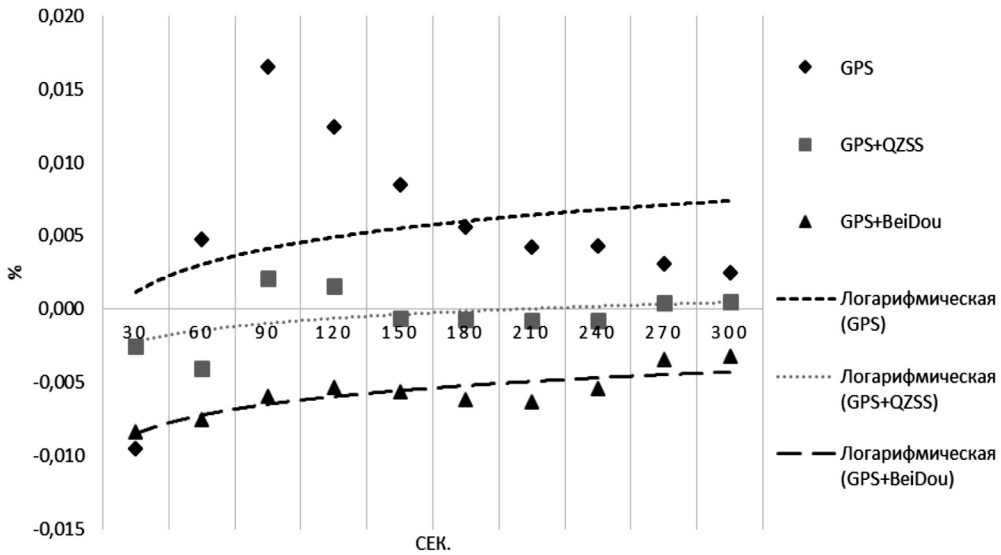


Рис. 3. Зависимость отклонения значений дисперсии (%) от результирующего значения по полной выборке

Fig. 3. Dependence of the deviation of the variance (%) from the resulting value by the full sample

Вычисленные значения дисперсий для указанных выборок принимают значения, представленные на рис. 5.

Диаграмма показывает, что две комбинации спутниковых систем (GPS+BeiDou и

GPS+QZSS) дают наименьшую дисперсию на рассматриваемых выборках. Зависимости отношения дисперсии к среднему значению (математическое ожидание) расстояния до «эталонного» центра составляют величину

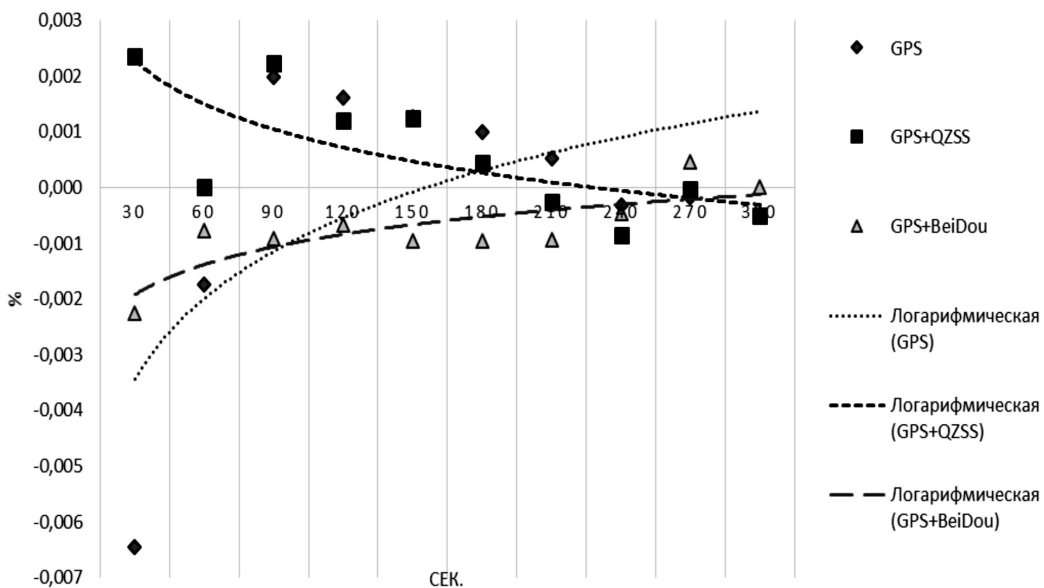


Рис. 4. Зависимость значения среднего расстояния до «эталонного» центра от размера выборки

Fig. 4. Dependence of the mean distance to the «reference» center on the sample size

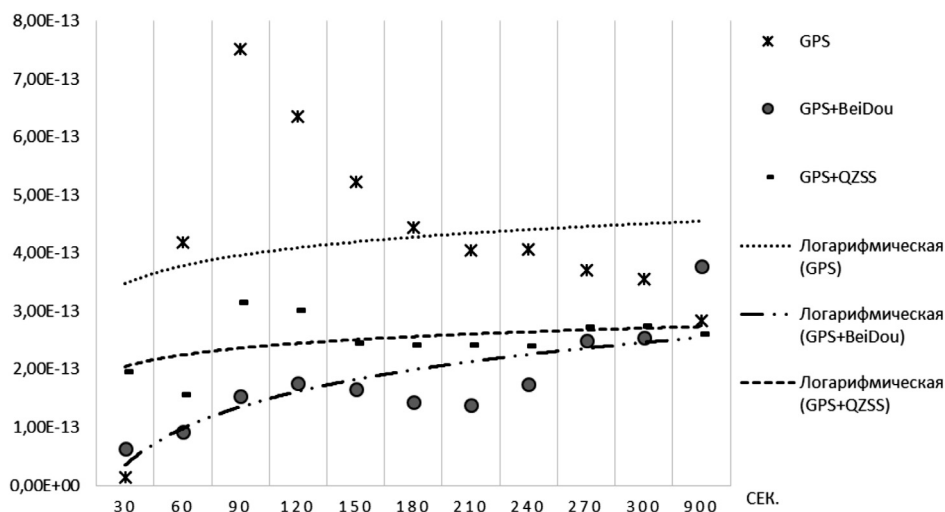


Рис. 5. Зависимость значения среднего расстояния до «эталонного» центра от размера выборки. GPS, GPS+BeiDou, GPS+QZSS

Fig. 5. Dependence of the mean distance to the «reference» center on the sample size. GPS, GPS+BeiDou, GPS+QZSS

порядка  $5 \cdot 10^{-7}$ , что свидетельствует о том, что процессы сходятся. Разность с «эталонным» значением составляет величину порядка  $10^{-7}$ .

По результатам экспериментов, проведённых в п. Рудный (Казахстан) установлено, что объём выборки, необходимой для

адекватной оценки точности систем спутникового позиционирования и их парных комбинаций, составляет 180 с. Наилучшая комбинация – GPS+BeiDou (рис. 6).

Результаты оценки данных (п. Рудный, Казахстан) по критерию «трех сигм» приведены в таблице. Анализ значений обоснованно

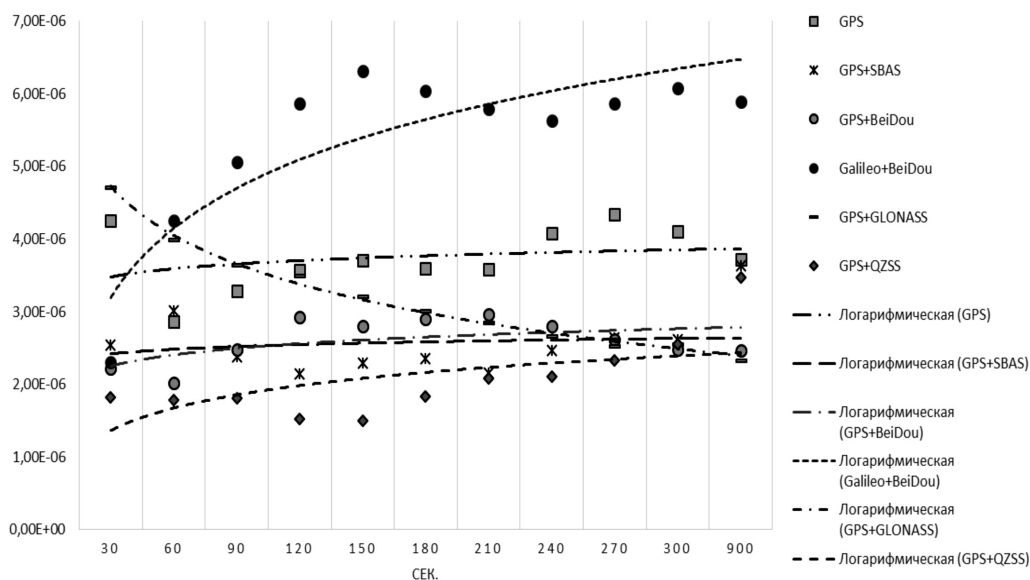


Рис. 6. Зависимость среднего расстояния до эталонного центра от объёма выборки (п. Рудный)

Fig. 6. Dependence of the average distance to the reference center on the sample size (Rudny)

Результаты оценки данных (п. Рудный, Казахстан) по критерию «трех сигм»

Results of data evaluation (Rudniy, Kazakhstan) according to the criterion of «three sigma»

Системы позиционирования	Математическое ожидание	Стандартное отклонение	1sigma	2sigma	3sigma	Количество точек	Доверительный интервал (0,95)
GLONASS+BeiDou	5889331,75	0,24195	0,65145	0,97649	0,98893	723	0,03527
GPS+BeiDou	5889330,10	0,27612	0,66867	0,96687	1,00000	664	0,04200
GPS+GLONASS	5889330,33	0,28061	0,77842	0,92086	0,97986	695	0,04172
GPS+SBAS	5889330,14	0,37960	0,67891	0,95224	1,00000	1361	0,04034
GPS+QZSS	5889331,17	0,43572	0,60634	0,97887	1,00000	1420	0,04533
Galileo+BeiDou	5889329,97	0,43600	0,56364	1,00000	1,00000	385	0,08710
GPS	5889330,16	0,52882	0,66667	0,95798	1,00000	714	0,07758
BeiDou	5889329,84	0,65315	0,72488	0,93900	1,00000	836	0,08855
GLONASS	5889332,81	0,68317	0,87734	0,96104	0,97547	693	0,10173
Galileo	5889327,00	1,95891	0,67878	0,94138	0,99414	853	0,26292

выводит предположение о том, что данные, полученные от систем спутникового позиционирования или их комбинаций, распределены нормально.

По результатам экспериментов, проведённых в Санкт-Петербурге (рис. 7),

установлено, что объём выборки, необходимой для адекватной оценки точности систем спутникового позиционирования и их парных комбинаций, составляет 180 с. Наилучшая комбинация – GPS+BeiDou (см. рис. 6).

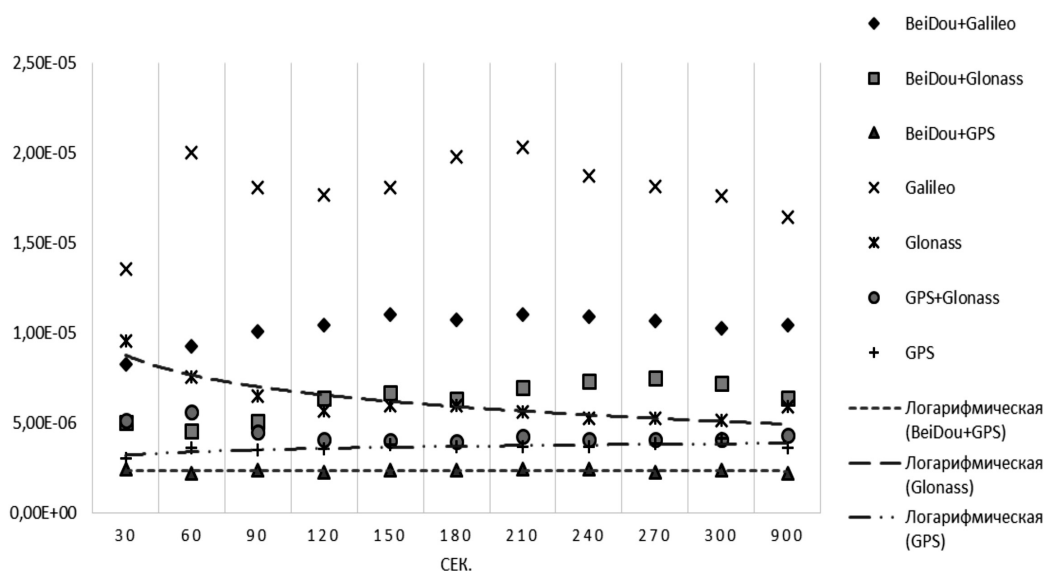


Рис. 7. Зависимость среднего расстояния до «эталонного» центра от размера выборки (Санкт-Петербург)

Fig. 7. Dependence of the average distance to the «reference» center on the sample size (St. Petersburg)



По результатам экспериментов, проведённых в г. Конаклы (Турция), установлено, что объём выборки, необходимой для адекватной оценки точности систем спутникового позиционирования и их парных комбинаций, составляет 120 с. Наилучшая комбинация - GPS+BeiDou.

### Выводы

В работе предложена методика выбора наиболее точной системы спутникового позиционирования или их комбинаций. Представленное решение может использоваться для навигационного обеспечения в задачах управления автономными наземными роботами/транспортными средствами. Использование представленного решения позволяет сократить время выбора наиболее точной системы спутникового позиционирования или парных комбинаций систем в условиях отсутствия дифференциальных поправок и полей точности систем спутниковой

навигации, сформированных для данной местности, и сведений о начальном географическом положении объекта;

ограниченных вычислительных мощностей автономного объекта;

использования одноканального приёмника навигационных сигналов.

По результатам проведённых исследований можно сделать вывод о том, что при использовании одноканального приёмника навигационных сигналов для выбора наиболее точной системы спутникового позиционирования или их парных комбинаций необходимо с помощью представленного в данной статье алгоритма провести оценку данных, полученных от систем позиционирования и их комбинаций, в объёме 180 с для каждого варианта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-29-04319.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаренко Г.К., Алешечкин А.М. Исследование алгоритма фильтрации при определении координат объекта по сигналам спутниковых радионавигационных систем // Доклады ТУСУР. 2012. № 2(26). Ч. 2. С. 15–18.
2. Дворкин В.В., Карутин С.Н. Высокоточные навигационные определения по сигналам ГНСС // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 6 (52). С. 70–76.
3. Xingxing Li, Maorong Ge, Xiaolei Dai, Xiaodong Ren, Mathias Fritsche, Jens Wickert, Harald Schuh Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo // Journal of Geodesy. 2015. Vol. 89. Issue 6. Pp. 607–635.
4. Xingxing Li, Xiaohong Zhang, Xiaodong Ren, Mathias Fritsche, Jens Wickert, Harald Schuh Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou // Scientific Reports 5. 2015. Article No. 8328.
5. Глобальная служба навигационных спутниковых систем. The International GNSS Service // URL: <http://www.igs.org/> (Дата обращения: 01.09.2017).
6. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Выща шк. Головное изд-во, 1989. 431 с.
7. Скрыпник О.Н., Нечаев Е.Е., Арёфьев Р.О. Построение и анализ полей точности GPS на основе программно-аппаратных средств NI GPS Simulation Toolkit // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2014. № 209. С. 5–12.
8. Гаврилов А.В. Использование фильтра Калмана для решения задач уточнения координат БПЛА // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1.
9. Schüler T. On ground-based GPS tropospheric delay estimation. München: Univ. der Bundeswehr, 2001. 364p.
10. Хуторова О.Г., Тептин Г.М., Васильев А.А., Хуторов В.Е., Шлычков А.П. Пассивное зондирование структуры коэффициента преломления радиоволн в тропосфере сетью приёмников спутниковых навигационных систем в г. Казани // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 1. С. 1–8.

Статья поступила в редакцию 04.11.2017.

## REFERENCES

1. **Makarenko G.K., Aleshechkin A.M.** Study on filtering algorithms to determine the coordinates of an object by the signals of satellite navigation systems. *Proceedings of TUSUR*, 2012, No. 2 (26), Part 2. (rus)
2. **Dvorkin V.V., Karutin S.N.** Precise positioning according to GNSS signal. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva (VestnikSibGAU)*, 2013, No. 6 (52), Pp. 70–76. (rus)
3. **Xingxing Li, Maorong Ge, Xiaolei Dai, Xiaodong Ren, Mathias Fritsche, Jens Wickert, Harald Schuh** Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*, 2015, Vol. 89, Issue 6, Pp. 607–635.
4. **Xingxing Li, Xiaohong Zhang, Xiaodong Ren, Mathias Fritsche, Jens Wickert, Harald Schuh** Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Scientific Reports* 5, 2015, Article No. 8328.
5. *Globalnaya sluzhba navigatsionnykh sputnikovykh sistem. The International GNSS Service*. Available: <http://www.igs.org/> (Accessed: 01.09.2017).
6. **Zaytsev G.F.** *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya i regulirovaniya [Theory of automatic control and regulation]*. Kiyev: Vyshcha shk. Publ., 1989, 431 p. (rus)
7. **Skrypnik O.N., Nechayev Ye.Ye., Arefyev R.O.** Construction and analysis of GPS accuracy fields on the basis of hardware-software means NI GPS Simulation Toolkit. *Scientific bulletin of the Moscow state technical university of civil aviation*, 2014, No. 209, Pp. 5–12. (rus)
8. **Gavrilov A.V.** Ispolzovaniye filtra Kalmana dlya resheniya zadach utochneniya koordinat BPLA [Using the Kalman filter to solve the UAV coordinate refinement problems]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]*, 2015, No. 1-1. (rus)
9. **Schüler T.** On ground-based GPS tropospheric delay estimation. München: Univ. der Bundeswehr, 2001, 364 p.
10. **Khutorova O.G., Teptin G.M., Vasilyev A.A., Khutorov V.Ye., Shlychkov A.P.** Passivnoye zondirovaniye struktury koeffitsiyenta prelomleniya radiovoln v troposphere setyu priyemnikov sputnikovykh navigatsionnykh sistem v g. Kazani [Sensing of the structure of the radio wave refractivity in the troposphere by a network of satellite navigation system receivers in the city of Kazan]. *Izvestiya vuzov. Radiofizika [Radiophysics and Quantum Electronics]*, 2011. Vol. 54, No. 1, Pp. 1–8. (rus)

Received 04.11.2017.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

**КУРОЧКИН Леонид Михайлович**

**KUROCHKIN Leonid M.**

E-mail: kurochkinl@spbstu.ru

**КУРОЧКИН Михаил Александрович**

**KUROCHKIN Mikhail A.**

E-mail: kurochkin\_ma@spbstu.ru

**ПОПОВ Сергей Геннадьевич**

**POPOV Sergey G.**

E-mail: popovserge@spbstu.ru

**ПОПОВ Михаил Викторович**

**POPOV Mikhail V.**

E-mail: spbmvp@gmail.com