

С.Г. Попов, В.С. Заборовский, Л.М. Курочкин, М.П. Шарагин,
Л. ЧЖАН

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО ВЫБОРА СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В АВТОНОМНОМ РЕЖИМЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Попов С.Г., Заборовский В.С., Курочкин Л.М., Шарагин М.П., Чжан Л. Метод динамического выбора спутниковой навигационной системы в автономном режиме позиционирования.

Аннотация. Перечень прикладных задач, требующих точного оперативного позиционирования, постоянно растет. К таким задачам относятся: задачи управления группами автономных мобильных роботов; геодезические задачи высокоточного позиционирования; задачи навигации и мониторинга в интеллектуальных транспортных системах. Источником данных для оперативного позиционирования в таких задачах являются спутниковые навигационные системы. Активно используются глобальные и локальные спутниковые навигационные системы: GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo. Их характеризует разная полнота развертывания спутниковой группировки, что определяет точность оперативного позиционирования в конкретной географической точке, которая зависит от числа доступных для наблюдения спутников, а также характеристик приемника, особенностей ландшафта, погодных условий и возможности использования дифференциальных поправок.

Повсеместное использование дифференциальных поправок на данный момент невозможно ввиду того, что количество стабильно работающих опорных станций ограничено — Земля покрыта ими неравномерно; надежные сети передачи данных, необходимые для передачи дифференциальных поправок также развернуты не повсеместно; широкое применение нашли бюджетные версии одноканальных приемников навигационного сигнала, не позволяющие использовать дифференциальные поправки. В этом случае возникает задача оперативного выбора системы или комбинации систем спутникового позиционирования, предоставляющей наиболее точные навигационные данные. Приведено сравнение статического и динамического методов выбора системы или комбинации систем спутникового позиционирования, обеспечивающих наиболее точное определение собственных координат объекта при использовании одноканального приемника навигационных сигналов в автономном режиме (без использования сторонних поправок). Выбор осуществляется на основе статистического анализа данных, получаемых от систем спутникового позиционирования. При проведении анализа выполнялось сравнение результатов, сформированных при постобработке данных, полученных от спутниковых навигационных систем и уточненных с применением дифференциальных поправок навигационных данных.

Ключевые слова: навигация автономных мобильных объектов; статистический анализ навигационных данных; методы выбора системы спутникового позиционирования.

1. Введение. Основным средством определения координат наземного объекта являются данные, получаемые от спутниковых систем позиционирования. На разных стадиях развертывания, эксплуатации и использования находится глобальные и

региональные национальные системы спутникового позиционирования, такие как: GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou. Постоянное наращивание группировок спутников и их модернизация обеспечивают повышение точности позиционирования. Однако из-за влияния различных факторов позиционирование с использованием различных систем обеспечивается с разной точностью, особенно при использовании бюджетных приемников мобильными автономными объектами. Ключевыми особенностями бюджетных приемников являются сравнительно невысокая стоимость и компактное исполнение, что достаточно значимо при массовом производстве, например, мобильных роботов. К важным особенностям бюджетных приемников следует отнести: использование одного диапазона для получения данных от спутников и возможность одновременного использования нескольких систем спутниковой навигации. Использование одного диапазона получения данных от спутников обеспечивает меньшую точность позиционирования, по сравнению с одновременным использованием нескольких диапазонов приема навигационных данных.

На точность координат, получаемых от спутниковых навигационных систем, влияют: взаимное расположение спутников, от которых может быть получен сигнал; погодные условия; особенности рельефа в конкретной точке определения координат, ионосферная и тропосферная рефракции [1-3].

При оценке точности навигационных данных оценивается ряд факторов [4]:

- геометрический фактор снижения точности (GDOP);
- горизонтальный фактор снижения точности (HDOP);
- фактор снижения точности определения положения (PDOP);
- относительный фактор снижения точности (RDOP);
- временной фактор снижения точности (TDOP);
- вертикальный фактор снижения точности (VDOP).

Анализ точности определения координат и выбор наиболее точной системы спутникового позиционирования или комбинации таких систем вызывает интерес как у исследователей, так и у специалистов, решающих прикладные задачи. Точность определения координат в автономном режиме (т.е. без сторонних поправок) может быть повышена за счет применения фильтрации данных, использования поправок, например RTK [5], средствами библиотеки программ с открытым исходным кодом RTKLib [6] или проприетарных решений [7], использования комбинации спутниковых

навигационных систем, разработки и использования методов повышения точности навигационного обеспечения.

Подготовку и распространение дифференциальных поправок, используемых для передачи на абонентские приемники для корректировки принимаемых ими навигационных сигналов, обеспечивают несколько систем: американская WAAS (Wide Area Augmentation System) для GPS, Европейская — EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) для Galileo, Японская — MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System), СДКМ (система дифференциальной коррекции и мониторинга) для GLONASS. Каждая из систем имеет собственный набор спутников, оборудованных передатчиками навигационных сигналов, а приемники — специализированным программным обеспечением для проведения обработки и уточнения навигационных данных.

Для снижения влияния случайной погрешности на точность определения координат спутниковых систем при решении навигационных задач используются методы фильтрации, например, фильтр Калмана и расширенный фильтр Калмана [8-11]. Предложенный в работе [8] метод, основанный на применении фильтра Калмана, позволяет сократить погрешность определения пространственных координат заданной точки более чем в 10 раз. Для борьбы с узкополосными помехами успешно разрабатываются адаптивные методы фильтрации сигнала, основанные на оценке интерференционной частоты [12].

Для решения задач управления воздушными судами, в частности захода на посадку, могут использоваться заранее сформированные поля точности спутниковой системы навигации, подготовленные с учетом повторяемости наблюдаемой орбитальной группировки. Работа [13] посвящена описанию процесса построения полей точности воздушного пространства на основании значений горизонтального (HDOP, Horizontal Dilution of Precision) и вертикального (VDOP Vertical Dilution of Precision) геометрического фактора в выбранных точках воздушного пространства. Результаты, представленные в работе, подтверждают целесообразность использования описанных методов для оценки условий навигационного сеанса, а также построения полей точности GPS в заданной зоне воздушного пространства.

Исследование методов высокоточного навигационного обеспечения, учитывающего погрешности, которые вызваны ошибками эфемеридно-временной информации, влияния релятивистских, гравитационных и приливных эффектов, ошибки

многолучевости, приведены в работе [14]. Анализ приведенного метода показывает, что его точность сравнима с точностью позиционирования, выполненного с учетом RTK поправок.

Анализ результатов совместного использования навигационных систем GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo также привлекает внимание исследователей [15]. Представленный в работе [16] анализ показывает, что при совместном использовании BeiDou и Galileo точность позиционирования составляет менее 0,1 м, при совместном использовании GLONASS и GPS — менее 0,05 м. Совместное использование систем BeiDou, Galileo, GLONASS и GPS сокращает время конвергенции почти на 70%, тогда как точность позиционирования возрастает примерно на 25%. В современной литературе представлены и другие методы повышения точности позиционирования, основанные на одновременном использовании нескольких спутниковых систем позиционирования в различных режимах работы. Большинство описанных методов требуют значительных временных затрат либо использования многодиапазонного приемника навигационных сигналов [17].

Анализ зависимостей доступности различных спутниковых систем позиционирования и точности предоставляемых ими данных, от периода наблюдения, состояния конкретной группировки или их комбинаций, позволяет сформировать рекомендации для выбора комбинации систем спутниковой навигации, предоставляющей наиболее точные данные в конкретный момент в заданной географической точке. Результаты такого рода исследований представлены в работе [18]. В некоторых исследованиях проводится анализ траекторий спутников и предугадывание потери связи со спутником [19].

Сбором, анализом и распространением параметров функционирования спутниковых группировок и данных, полученных от глобальных систем позиционирования, занимается глобальная служба навигационных спутниковых систем [20]. К таким данным относятся оценки задержки передачи сигнала, параметры вращения Земли и спутниковые эфемериды. Указанные параметры и данные предоставляют более двухсот агентств, исследовательских институтов, университетов. Перечисленные параметры и данные применяются при постобработке навигационных данных. Постобработка позволяет повысить точность навигационных данных, используемых как при решении фундаментальных, так и прикладных задач.

Целью данной работы является сравнение методов оперативного выбора системы или комбинации систем спутникового позиционирования, предоставляющей наиболее точные

навигационные данные. Указанный выбор производится в автономном режиме с использованием методов статистического анализа.

2. Технические средства получения данных спутниковых навигационных систем. На рынке представлено множество приемников сигналов спутниковых навигационных систем от модулей, предназначенных для реализации встроенных применений в устройствах, требующих определения собственного местоположения, до геодезических станций, обеспечивающих точность определения местоположения до сантиметров. Большинство мобильных устройств оснащаются приемниками сигналов спутниковых навигационных систем, которые способны работать с несколькими системами спутниковой навигации. Все приемники отличаются по стоимости от ультра-бюджетных до дорогостоящих.

На рисунке 1 представлена классификация современных приемников сигналов систем спутникового позиционирования.

1) Используемые рабочие частоты приемника. На данный момент наиболее часто используемыми являются частоты L1, L2, L5 либо их комбинации. Большинство бюджетных приемников поддерживают только частоты L1, L2.

2) Количество каналов приемника: существуют одноканальные и многоканальные приемники. Количество каналов позволяет параллельно получать данные от спутников разных навигационных систем, что увеличивает скорость получения данных. Наиболее популярные реализации многоканальных приемников поддерживают от 12 до 200 каналов.

3) Частота обновления навигационных данных, формируемых приемником. В большинстве реализаций бюджетных приемников частота обновления навигационной информации предустановлена и зафиксирована. В специализированных реализациях приемников обновления навигационной информации предусмотрена возможность выбора частоты обновления навигационной информации. Как правило, частоты обновления менее 1Гц не используются.

4) Формат передачи навигационных данных — возможность приемника передавать навигационные данные потребителю в различных форматах. Для бюджетных приемников наиболее часто используется протокол NMEA (National Marine Electronics Association).

5) Время старта перед выдачей фиксированных навигационных данных — наименьший временной интервал, необходимый приемнику для подготовки решения по данным, полученным от спутниковой навигационной системы.

6) Форм-фактор. Встраиваемые, портативные, kit-наборы либо промышленные.

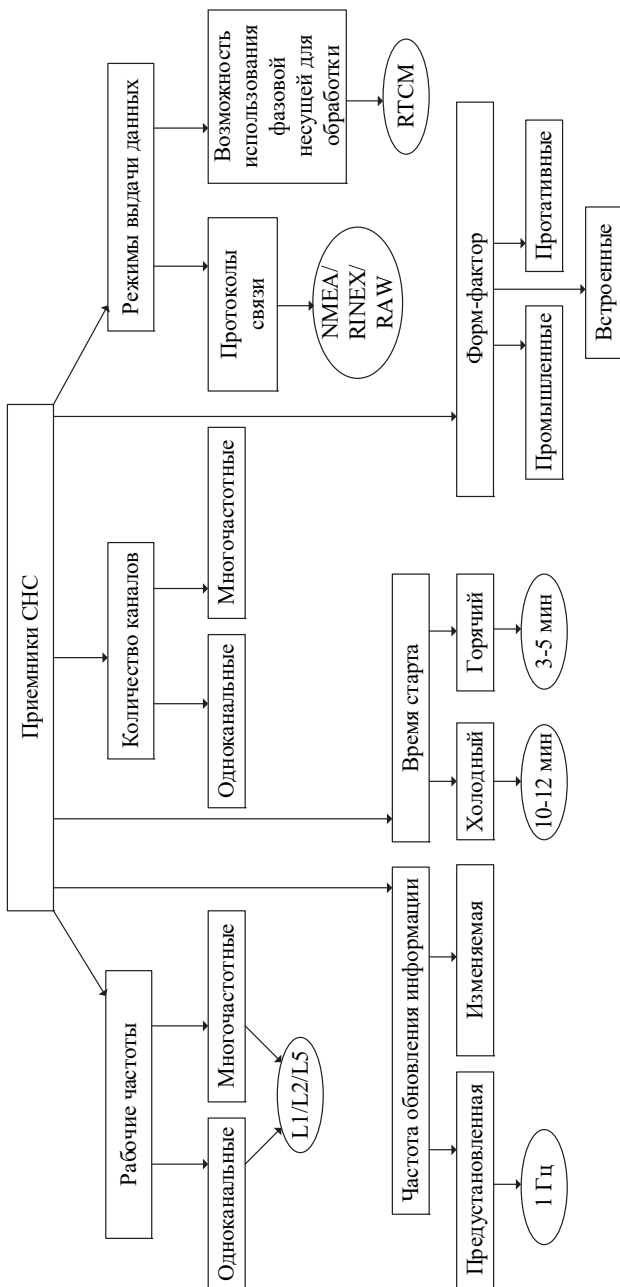


Рис. 1. Классификация приемников сигналов спутниковых навигационных систем по свойствам и потребительским качествам

3. Методы выбора системы спутникового позиционирования, предоставляющей наиболее точные навигационные данные. Необходимость оперативного выбора системы спутникового позиционирования или комбинации таких систем, предоставляющих наиболее точные навигационные данные, возникает в задачах автономного группового управления наземными мобильными робототехническими системами; в задачах навигационного/информационного обеспечения интеллектуальных транспортных систем; в прочих задачах, требующих точного оперативного определения собственных координат при использовании бюджетных многоканальных приемников навигационных сигналов.

Мобильный объект/робот, не обладающий возможностью оперативного получения дифференциальных поправок навигационной информации, способен самостоятельно выбрать наиболее точную систему спутникового позиционирования (систему, предоставляющую наиболее точные навигационные данные), используя статический или динамический метод.

Статический метод описан в работе [21]. Указанный метод основан на статистическом анализе наборов собственных координат неподвижного объекта/робота, полученных от различных систем спутниковой навигации, или их комбинаций за равные интервалы времени T . Для каждого набора собственных координат вычисляется положение «эталонного» центра — точки с координатами, равными среднему значению соответствующих координат в наборе. Далее вычисляются среднее евклидово расстояние от всех точек набора собственных координат до вычисленного «эталонного» центра и дисперсия указанных расстояний до «эталонного» центра.

Рекомендуемой для использования системой спутникового позиционирования или комбинацией таких систем принимается система или комбинация, показавшая наименьшие среднее расстояние до центра и дисперсию.

Метод, предлагаемый в данной работе, отличается от метода, приведенного в работе [21], использованием динамических оценок расстояния до вычисленного «эталонного» центра и дисперсии. Указанные оценки формируются и уточняются по мере получения новых координат. Для формирования оценок используются наборы собственных координат неподвижного объекта/робота, которые были предоставлены различными системами спутниковой навигации, или их комбинациями. По мере получения новых значений собственных координат указанный набор смещается в последовательной выборке на s значений, для оценки используются значения собственных координат

от $k+s$ до $k+m+s$. Применяется следующая терминология: m — размер «окна» — количество собственных координат, используемых для формирования оценок, s — «шаг окна» — количество собственных координат, последовательно полученных во времени, на которое смещается «окно». Блок-схема динамического метода выбора системы спутникового позиционирования приведена на рисунке 2.

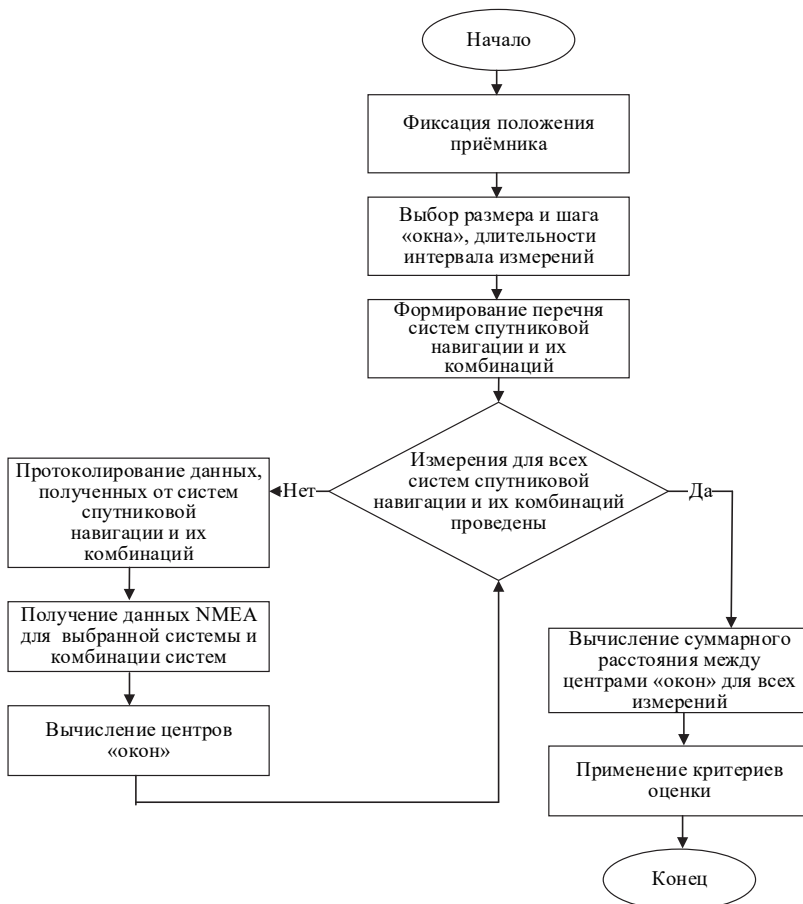


Рис. 2. Блок-схема динамического метода выбора спутниковой навигационной системы или комбинации систем

В рамках проводимого апостериорного анализа навигационных данных вычислялись оценки: суммарного расстояния между центрами «окон» в рамках одного эксперимента и суммарного расстояния между

центрами «окон» и уточненным центром полной выборки, вычисленным с использованием дифференциальных поправок для навигационных данных GPS. Центры «окон» вычислялись с помощью алгоритмов k-means, c-means с одним центром. Центр, полученный по средствам применения k-means с одним центром, фактически совпадает со средним значением, вычисленным по выборке. Центр, вычисленный по средствам применения c-means с одним центром, используется для сравнительной оценки среднего значения по выборке.

Уточненный центр полной выборки использовался в качестве точного значения координат приемника для оценки погрешности определения координат при обработке данных, полученных от систем спутниковой навигации и их комбинаций без использования дифференциальных поправок. Суммарное расстояние между центрами «окон», полученное в рамках одного эксперимента, является альтернативной оценкой точности определения собственных координат при обработке данных от систем спутниковой навигации и их комбинаций без использования дифференциальных поправок. Графическая иллюстрация оценки положения центров «окон», уточненного центра полной выборки представлена на рисунке 3.

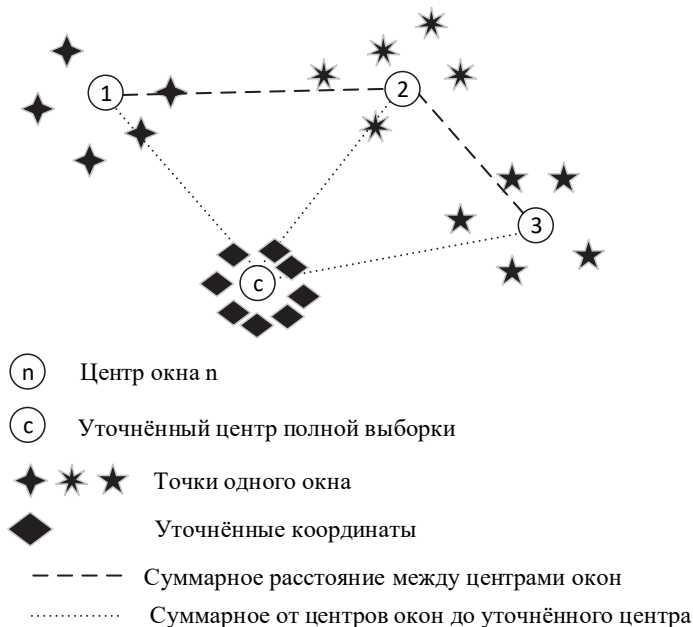


Рис. 3. Положения центров «окон», уточненного центра полной выборки

В рамках апостериорного анализа данных, полученных от систем спутниковой навигации и их комбинаций, проводилась оценка точности определения собственных координат для полных выборок навигационных данных и для выборок, прошедших фильтрацию выбросов. При фильтрации данных из выборок удалялись значения, среднеквадратичное отклонение которых превышало n сигма, где n принимало значения: 3, 2.75, 2.5, ... 1.25, 1. После каждой фильтрации вычислялись центры выборок. При оценке точности определения собственных координат проводилось сравнение расстояний от центров «фильтрованных» выборок, вычисленных методами k-means, c-means до центра, выборки GPS, уточнённой с использованием дифференциальных поправок.

4. Оборудование и условия проведения экспериментов. При проведении серии экспериментов использовался приемник EVK-7 Multi-GNSS evaluation kit. Под серией экспериментов подразумеваются измерения, проводимые в одной географической точке. Антенна приемника располагалась неподвижно на протяжении всех экспериментов серии. Осуществлялся выбор системы спутникового позиционирования или парного набора таких систем, затем осуществлялось протоколирование навигационных данных на протяжении интервала — 15 минут. Частота получения данных от приемника — 1 Гц. В экспериментах участвовали системы спутникового позиционирования GPS, Glonass, BeiDou, Galileo, QZSS, SBAS и их парные комбинации. То есть для каждой системы или комбинации систем в рамках каждого эксперимента было получено порядка 900 координат, всего в каждой точке проводилось 20 экспериментов (6 — для каждой системы, 14 — для каждой парной комбинации систем). Эксперименты проводились в Санкт-Петербурге (Россия) и в Мадриде (Испания). В Санкт-Петербурге и Мадриде были выбраны по две точки, в каждой из которых проводилась серия измерений. Серии измерений проводились в разные дни и время суток. Анализ данных проводился апостериорно. Полученные данные обрабатывались согласно методам, приведенным выше. Точки проведения эксперимента были удалены друг от друга с целью оценки влияния неоднородности покрытия Земли сигналом спутниковых навигационных систем.

Для статического метода проводилась оценка отклонений среднего расстояния от центра обрабатываемой выборки до вычисленного «эталонного» центра выборки, сформированного по полной пятнадцатиминутной выборке. В обрабатываемой выборке использовались наборы точек от первого измерения до k-го, где k

принимало значения 30 с, 60 с, 90 с, ..., 900 с. То есть проводилось сравнение «эталонного» центра, полученного по пятнадцатиминутной выборке, и значений центров, полученных по обрабатываемым выборкам указанных размеров. Также проводилось сравнение дисперсий значений, присутствующих в обрабатываемых выборках. Выборку размером 30 с можно считать репрезентативной, так как среднее значение по выборке отличается менее чем на 1 % от среднего значения по выборке размером 60 с.

Для динамического метода размер «окна» принимал значения 30 с, 60 с, 90 с, ..., 300 с, шаг «окна» был равен 60 с.

5. Анализ экспериментальных данных. Результаты исследований статического метода, приведенные в [21], показывают, что значения среднего расстояния до «эталонного» центра выборки для набора измерений, полученных при использовании различных систем спутниковой навигации и их парных комбинаций, может значительно отличаться в рамках проведения одной серии эксперимента (серии пятнадцатиминутных измерений). Например, для экспериментов, проведенных в Мадриде, значение среднего отклонения центра выборки от «эталонного» центра, вычисленного в результате обработки пятнадцатиминутной выборки, отличается более чем в 7.5 раз для данных, полученных от навигационных систем Galileo и GPS (рисунок 4). По оси абсцисс (размер выборки) приведены значения объемов выборок для которых вычислялось отклонение.

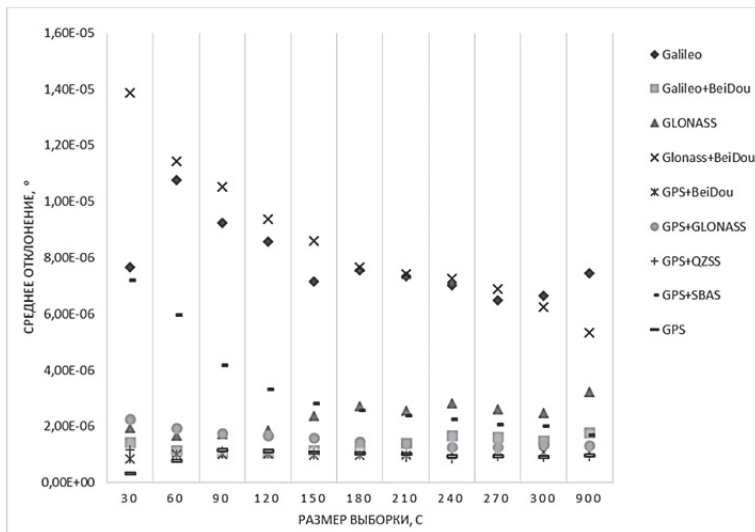


Рис. 4. Среднее отклонение от «эталонного» центра (Мадрид)

Дисперсия соответствующих измерений (Galileo и GPS) отличается более чем в 97 раз (рисунок 5). Наименьшую дисперсию и, соответственно, расстояние до эталонного центра обеспечивает GPS.

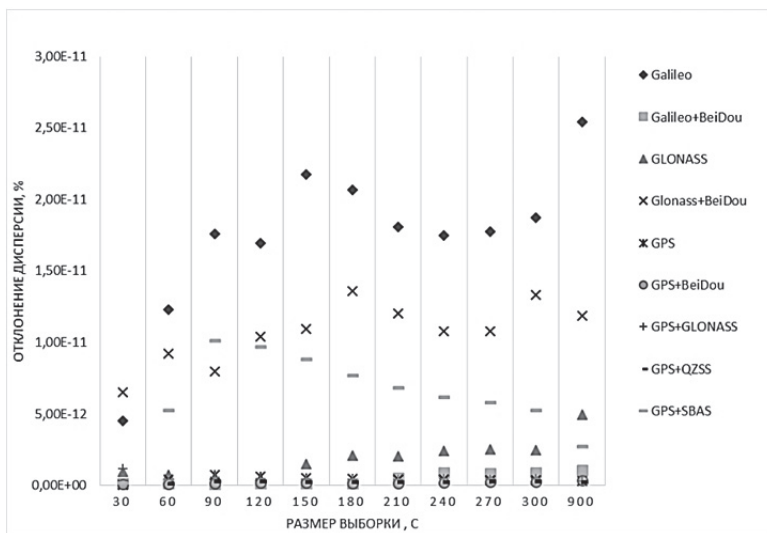


Рис. 5. Зависимость дисперсии среднего расстояния до «эталонного» центра (Мадрид) от размера выборки

Зависимость значений дисперсии навигационных данных для систем спутниковой навигации, показавших наименьшие значения среднего расстояния до «эталонного» центра, изображены на рисунке 6.

Представленная диаграмма показывает, что для выборок, навигационных данных, полученных за временные интервалы 150 и более секунд, значение дисперсии отличается от «эталонного» не более чем на 0.01 %.

Диаграмма, представленная на рисунке 7, 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. Вычисленные значения дисперсий для указанных выборок принимают следующие значения (рисунок 8).

Представленные зависимости показывают, что комбинации спутниковых систем GPS + BeiDou и GPS + QZSS обеспечивают наименьшие значения дисперсий навигационных данных. Отношения

дисперсии к математическому ожиданию (оценка расстояния до «эталонного» центра) составляют величину порядка $5 \cdot 10^{-7}$, что подтверждает, что процессы сходятся.

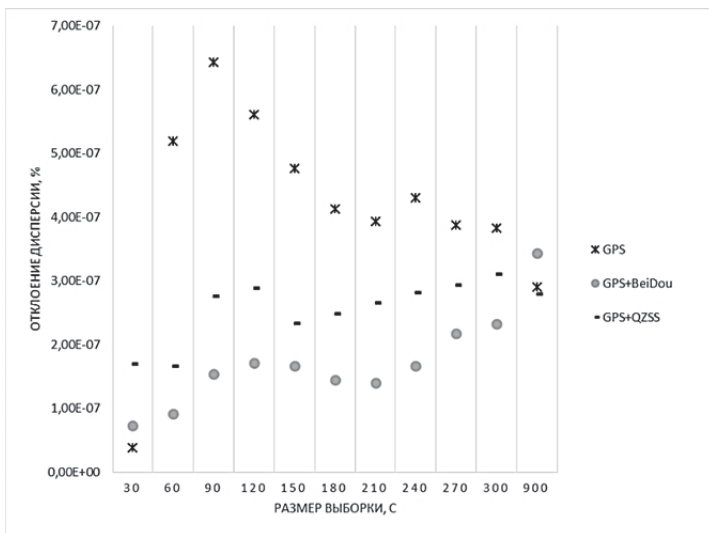


Рис. 6. Зависимость отклонения значений дисперсии (%) от результирующего значения по полной выборке

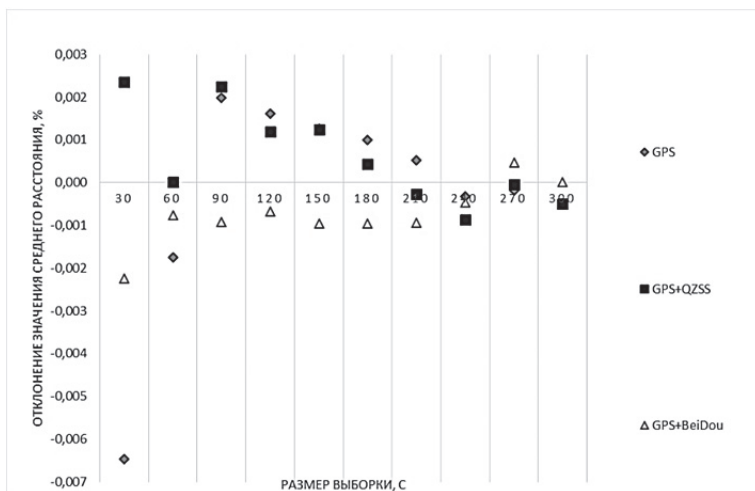


Рис. 7. Зависимость отклонения значения среднего расстояния до «эталонного» центра от размера выборки

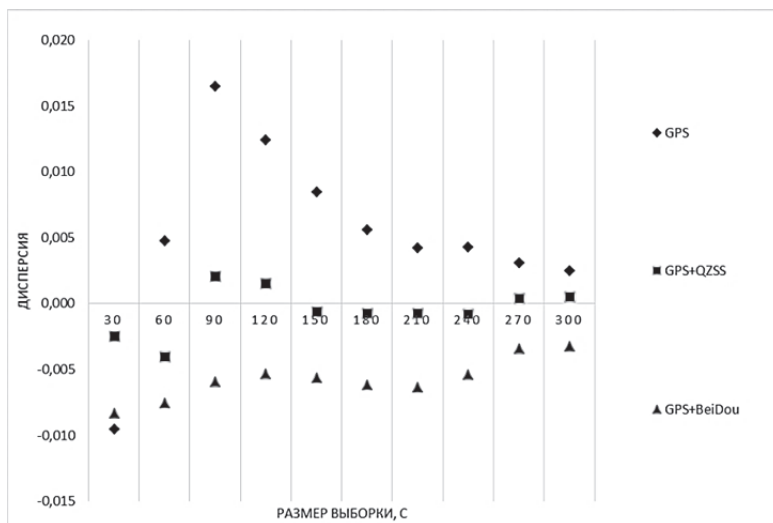


Рис. 8. Зависимость дисперсии выборки от размера выборки. GPS, GPS+BeiDou, GPS+QZSS

По результатам представленных экспериментов можно сделать вывод, что для оценки точности навигационных данных, получаемых от системы спутниковой навигации или парной комбинации таких систем, необходима обработка выборок навигационных данных, полученных за время порядка трех минут.

При исследовании динамического метода выбора навигационной системы для каждой серии экспериментов проводилось сравнение вычисленных центров «окон» с уточненным значением положения приемника. Уточненное значение положения приемника вычислялось с использованием дифференциальных поправок для данных, полученных в данной серии эксперимента от навигационной системы GPS.

Значения отклонений от уточненного значения положения приемника использовались для оценки точности метода и выбора его параметров. На рисунке 9 представлена зависимость изменения суммарного расстояния между центрами «окон» для первой серии эксперимента, проводимого в Санкт-Петербурге. В данном эксперименте размер «окна» принимал значения 60 с, 90 с, 120 с ... 300 с, «окно» двигалось с шагом 60 с. Для данной серии экспериментов наименьшее значение суммарного расстояния между центрами «окон» обеспечивает использование комбинации систем спутниковой навигации GPS и SBAS.

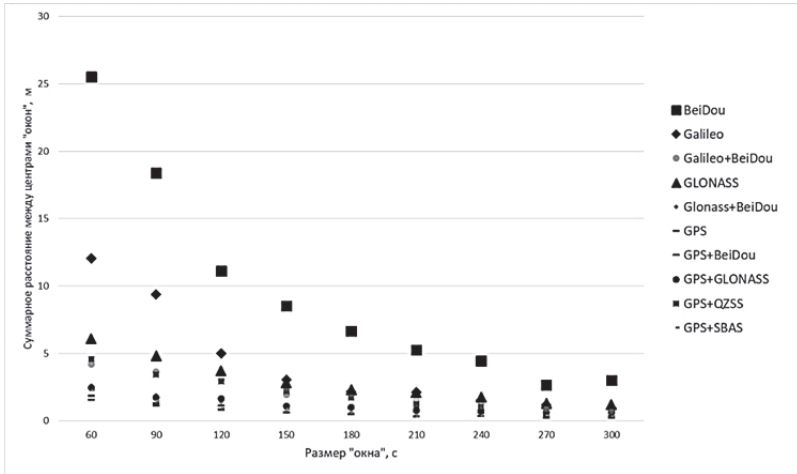


Рис. 9. Суммарное расстояние между центрами окон (Санкт-Петербург, первый эксперимент)

Эта же комбинация систем спутниковой навигации обеспечивает наименьшее расстояние от центра «окна» до уточненного центра, вычисленного с использованием дифференциальных поправок для навигационных данных, полученных от GPS (рисунок 10).

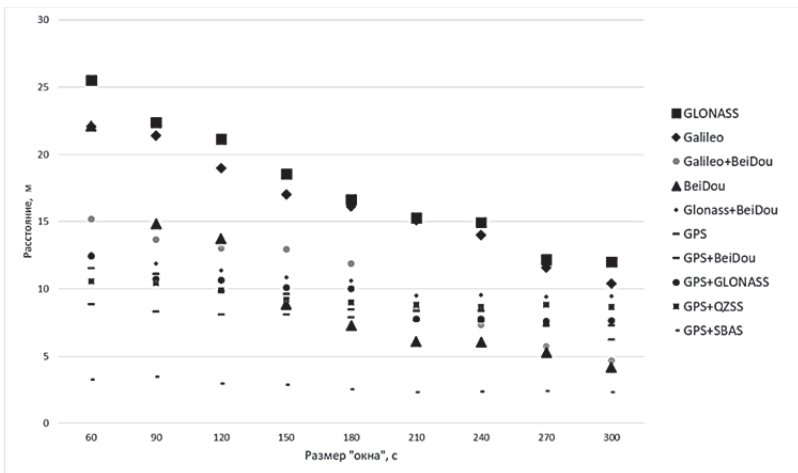


Рис. 10. Расстояние от центра «окна» до уточненного по GPS центра (Санкт-Петербург, первый эксперимент)

В таблице 1 приведены значения отношений суммарных расстояний между центрами окон для наименьшего суммарного расстояния, обеспечиваемого в данной серии экспериментов комбинацией спутниковых систем GPS и SBAS. В таблице приведены значения для нескольких комбинаций систем спутниковой навигации, вычисленные в зависимости от размера «окна», используемого в серии экспериментов, а также усредненные по данным конкретного эксперимента дисперсии. Данные, приведенные в таблице, позволяют сделать вывод, что при использовании динамического метода выбора спутниковой навигационной системы использование «окна» размером 90 с. достаточно для формирования оценки точности навигационных данных, получаемых от спутниковой навигационной системы или комбинации систем. Среднее значение дисперсии подтверждает обоснованность выбора.

Таблица 1. Оценка точности по размеру окна (Санкт-Петербург, первый эксперимент)

		Отношение суммарного расстояния между центрами окон		
Размер «окна» сек.	Количество шагов	GPS+SBAS и BeiDou	GPS+SBAS и Galileo	GPS+SBAS и GPS+QZSS
60	8	11,18722	5,29396	2,00966
90	7	17,25133	8,81791	3,23396
120	7	13,05250	5,84847	3,41301
150	6	9,79725	3,48373	2,52817
180	6	12,37874	3,99748	3,20094
210	5	15,12715	6,08051	3,52487
240	5	12,26723	4,22035	2,94589
270	4	6,38588	2,86823	1,96481
300	4	9,52387	2,88521	2,16126
Средняя (по экспериментам) дисперсия навигационных данных		2,07669E-12	2,30942E-10	3,97981E-12

Серия экспериментов, проведенных в Мадриде, подтверждает утверждение о том, что при использовании динамического метода для оценки точности навигационных данных достаточно использовать «окно» размером 90 с. В первой серии экспериментов, проводимых в Мадриде, наибольшая точность навигационных данных была достигнута при использовании комбинации навигационных систем GPS и GLONASS. В рамках проводимой серии экспериментов указанная комбинация навигационных систем позволила сократить отклонение

центра «окна» от уточненного центра в 6.2 раза по сравнению с результатами обработки данных, полученных от комбинаций систем GLONASS и BeiDou. Зависимости суммарного расстояния между центрами окон от размера «окна» представлена на рисунке 11. Зависимости расстояний от центров «окон» до уточненного центра изображены на рисунке 12. Значения дисперсий по полной выборке навигационных данных отличаются на 2 порядка. Для комбинации GPS и Glonass значение составляет $5.4 \cdot 10^{-12}$, для комбинации Glonass и BeiDou, показавшей наименьшую точность, — $3.8 \cdot 10^{-10}$.

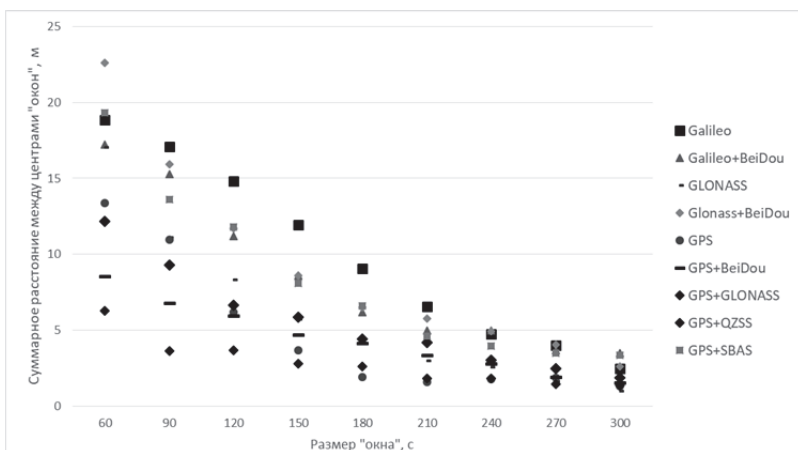


Рис. 11. Суммарное расстояние между центрами окон (Мадрид, первый эксперимент)

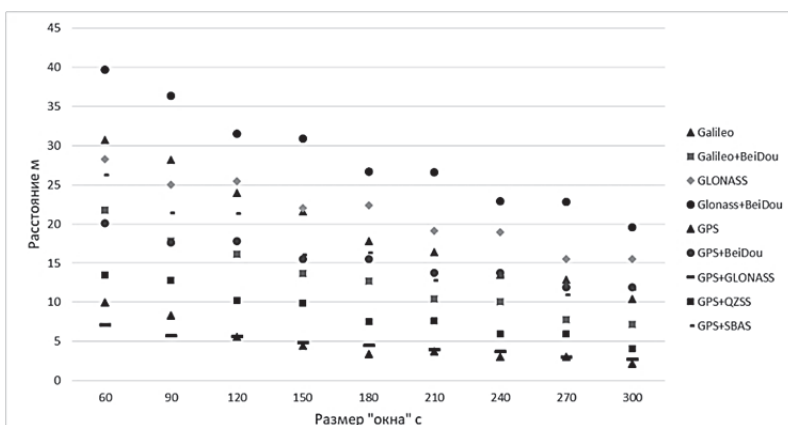


Рис. 12. Расстояние от центра «окна» до уточнённого по GPS центра (Мадрид, первый эксперимент)

В ходе анализа выборок данных, полученных после фильтрации, были вычислены расстояния от центров, вычисленных по методам k-means, c-means выборок, прошедших фильтрацию до центра уточненной с использованием дифференциальных поправок выборки GPS, прошедшей аналогичную фильтрацию. Результаты анализа первого эксперимента, проводимого в Мадриде, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Расстояния между центрами выборок после фильтрации (Мадрид, второй эксперимент)

sigma	GPS+SBAS		GPS+GLONASS		GPS+QZSS		GPS+BeiDou	
	k-means м	c-means м	k-means м	c-means м	k-means м	c-means м	k-means м	c-means м
3	0,649	0,660	0,347	0,375	0,845	0,815	1,258	1,275
2,75	0,653	0,669	0,358	0,378	0,839	0,815	1,275	1,274
2,5	0,672	0,674	0,365	0,371	0,831	0,777	1,287	1,303
2,25	0,732	0,728	0,366	0,368	0,821	0,786	1,295	1,299
2	0,740	0,752	0,359	0,355	0,800	0,779	1,314	1,311
1,75	0,771	0,792	0,373	0,364	0,805	0,761	1,312	1,307
1,5	0,797	0,812	0,388	0,378	0,814	0,770	1,318	1,322
1,25	0,817	0,826	0,393	0,382	0,816	0,772	1,320	1,316
1	0,830	0,841	0,393	0,385	0,820	0,797	1,324	1,315

Результаты, представленные в таблице 2, показывают, что фильтрация не дает ощутимого увеличения точности. При этом точность определения координат является достаточно высокой, а именно: для комбинации GPS+GLONASS расстояние между вычисленным центром и уточненным с использованием данных системы IGS (International GNSS Service) GPS центром составляет величину порядка 34 см. Для экспериментов, проведенных в Санкт-Петербурге, расстояние между центрами выборок, которые были получены для комбинаций систем спутниковой навигации, выбранными динамическим методом, составили величины порядка 45 см и 55 см для двух экспериментов. Для первого эксперимента, проводимого в Мадриде, — величину порядка 8 см. Значения расстояний до уточненного центра, вычисленные при обработке выборок навигационных данных, полученных от остальных систем

спутниковой навигации в рамках проводимых серий экспериментов, превосходили данные значения от 2 до 12 раз, что подтверждает корректность работы динамического метода выбора спутниковой навигационной системы в автономном режиме позиционирования.

6. Заключение. В работе предложен метод выбора системы спутникового позиционирования или комбинаций таких систем, обеспечивающий наибольшую точность определения собственных координат при использовании одноканальных приемников и без использования поправок навигационных данных.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что представленный в данной работе динамический метод позволяет сократить время выбора спутниковой навигационной системы вдвое по сравнению со статическим методом.

Точность навигационных данных, получаемых от системы спутниковой навигации или комбинации таких систем, выбранных с использованием предложенного метода, позволяет достигнуть точности определения собственных координат, сравнимой с точностью, получаемой при использовании постобработки с использованием данных системы IGS. Проведенные эксперименты показали возможность достижения точности определения собственных координат от единиц дециметров до единиц сантиметров.

Представленное решение может использоваться для навигационного обеспечения в задачах управления автономными наземными объектами. 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.

Литература

1. *Schüler T.* On ground-based GPS tropospheric delay estimation // Doctor's Thesis, Studiengang Geodsie und Geoinformation. 2001. vol. 73. 364 p.
2. *Хуторова О.Г. и др.* Пассивное зондирование структуры коэффициента преломления радиоволн в тропосфере сетью приёмников спутниковых навигационных систем в г. Казани // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 1. С. 1–8.
3. *Попов С.Г., Попов М.В.* Исследование методов повышения точности навигационных // Материалы научного форума с международным участием «Неделя науки СПбПУ». 2016. С. 8–10.

4. *Adrados C. et al.* Global Positioning System (GPS) location accuracy improvement due to Selective Availability removal // *Comptes Rendus Biologies*. 2012. vol. 325. no. 2. pp. 165–170.
5. *Siejka Z.* Validation of the accuracy and convergence time of real time kinematic results using a single galileo navigation system // *Sensors*. 2018. vol. 18(8). pp. 2412.
6. *Takács B., Siki Z., Markovits-Somogyi R.* Extension of RTKLIB for the Calculation and Validation of Protection Levels // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 2017. vol. 42. 6 p.
7. *Suldi A.M., Samad A.M.A., Hashim H.* Feasible study on establishment of a GPS reference station // 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications. 2012. pp. 362–366.
8. *Макаренко Г.К., Алешечкин А.М.* Исследование алгоритма фильтрации при определении координат объекта по сигналам спутниковых радионавигационных систем // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2-2(26). С. 15–18.
9. *Габрилов А.В.* Использование фильтра Калмана для решения задач уточнения координат БПЛА // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1-1. С. 1784–1784.
10. *Wans S.C. et al.* Study on an intelligent fault-tolerant technique for multiple satellite configured navigation under highly dynamic conditions // *Science China Information Sciences*. 2011. vol. 54. pp. 529–541.
11. *Hu J. et al.* An extended Kalman filter and back propagation neural network algorithm positioning method based on anti-lock brake sensor and global navigation satellite system information // *Sensors*. vol. 18. no. 19. pp. 2753.
12. *Ferrara N.G. et al.* A new implementation of narrowband interference detection, characterization, and mitigation technique for a software-defined multi-GNSS receiver // *GPS Solutions*. 2018. vol. 22(4). pp. 106.
13. *Скрыпник О.Н., Нечаев Е.Е., Арефьев 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.
14. *Дворкин В.В., Карутин С.Н.* Высокочастотные навигационные определения по сигналам ГНСС // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2013. № 6(52). С. 70–76.
15. *Guo J. et al.* Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture // *Precision Agriculture*. 2018. vol. 19(5). pp. 895–911.
16. *Li X. et al.* Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo // *Journal of Geodesy*. 2015. vol. 89. no. 6. pp. 607–635.
17. *Сератинас Б.Б.* Глобальные системы позиционирования // М.: ИФК «Каталог». 2002. 105 с.
18. *Li X. et al.* Precise Positioning with Current Multi-Constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou // *Scientific Reports*. 2015. vol. 5. pp. 8328.
19. *XiaoLei Y., Yongrong S., Jianye L., Jianfeng M.* Fast Algorithm of Selecting Satellites for Multiple Satellite Integrated Navigation Engineering // 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering. 2009. vol. 5. pp. 121–125.
20. The International GNSS Service. URL: <http://www.igs.org/> (дата обращения: 14.09.18).
21. *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*. 2018. Т. 10. № 4. С. 79–88.

Попов Сергей Геннадьевич — канд. техн. наук, доцент, доцент, кафедра телематики (при ЦНИИРТК) института прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). Область научных интересов: СУБД, робототехника, спутниковые навигационные системы. Число научных публикаций — 70. popovserge@spbstu.ru; 29, Политехническая, 195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: +79219613493.

Заборовский Владимир Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, профессор, кафедра телематики (при ЦНИИРТК) института прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). Область научных интересов: киберфизика, квантовые вычисления. Число научных публикаций — 135. vlad@neva.ru; 29, Политехническая, 195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: +7(921)9398954.

Курочкин Леонид Михайлович — канд. техн. наук, доцент, доцент, кафедра телематики (при ЦНИИРТК) института прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). Область научных интересов: робототехника, интеллектуальные транспортные сети. Число научных публикаций — 30. kurochkinl@spbstu.ru; 29, Политехническая, 195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: +7(921)3465767.

Шарагин Максим Павлович — аспирант, кафедра телематики (при ЦНИИРТК) института прикладной математики и механики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). Область научных интересов: машинное обучение, робототехника. Число научных публикаций — 3. msharagin@gmail.com; 29, Политехническая, 195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: +7(812)5526521.

Чжан Лэй — канд. техн. наук, профессор, Школа компьютерных наук и программного обеспечения, Восточно-китайский педагогический университет (ЭКНУ). Область научных интересов: спутниковые навигационные системы, робототехника. Число научных публикаций — 18. lzhang@ce.ecnu.edu.cn; 500, дор. Дунчуань, окр. Миньхан, 200241, Шанхай, Китай; р.т.: +86-18818223050.

Поддержка исследований. Госзадание, базовая часть: 2.9198.2017/8.9 Устойчивое управление гетерогенной группировкой киберфизических объектов в условиях пространственно-временной неопределённости.

S.G. POPOV, V.S. ZABOROVSKY, L.M. KUROCHKIN, M.P. SHARAGIN,
L. ZHANG

METHOD OF DYNAMIC SELECTION OF SATELLITE NAVIGATION SYSTEM IN THE AUTONOMOUS MODE OF POSITIONING

Popov S.G., Zaborovsky V.S., Kurochkin L.M., Sharagin M.P., Zhang L. **Method of Dynamic Selection of Satellite Navigation System in the Autonomous Mode of Positioning.**

Abstract. Today, the list of applications that require accurate operational positioning is constantly growing. These tasks include: tasks of managing groups of Autonomous mobile robots, geodetic tasks of high-precision positioning, navigation and monitoring tasks in intelligent transport systems. Satellite navigation systems are a data source for operational positioning in such tasks. Today, global and local satellite navigation systems are actively used: GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo. They are characterized by different completeness of satellite constellation deployment, which determines the accuracy of operational positioning in a particular geographical point, which depends on number of satellites available for observation, as well as the characteristics of the receiver, landscape features, weather conditions and the possibility of using differential corrections. The widespread use of differential corrections at the moment is not possible due to the fact that number of stable operating reference stations is limited - the Earth is covered by them unevenly; reliable data networks necessary for the transmission of differential corrections are also not deployed everywhere; budget versions of single-channel receivers of the navigation signal are widely used, which do not allow the use of differential corrections. In this case, there is a problem of operational choice of the system or a combination of satellite positioning systems, providing the most accurate navigation data. This paper presents a comparison of static and dynamic methods for selecting a system or a combination of satellite positioning systems that provide the most accurate definition of the object's own coordinates when using a single-channel receiver of navigation signals in offline mode. The choice is made on the basis of statistical analysis of data obtained from satellite positioning systems. During the analysis, the results of post-processing of data obtained from satellite navigation systems and refined with the use of differential corrections of navigation data were compared.

Keywords: Navigation of Autonomous Mobile Objects, Statistical Analysis of Navigation Data, Methods of Satellite Positioning System Selection.

Popov Sergey Gennad'evich — Ph.D., Associate Professor, Associate Professor, Telematics Department of Institute of Applied Mathematics and Mechanics, St. Petersburg and Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Research interests: DBMS, robotics, satellite navigation systems. The number of publications — 70. popovserge@spbstu.ru; 29, Polytechnicheskaya, 195251, St.Petersburg, Russian Federation; office phone: +7(921)9613493.

Zaborovsky Vladimir Sergeevich — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Professor, Telematics Department of Institute of Applied Mathematics and Mechanics, St. Petersburg and Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Research interests: cyberphysics, quantum computing. The number of publications — 135. vlad@neva.ru; 29, Polytechnicheskaya, 195251, St.Petersburg, Russian Federation; office phone: +7(921)9398954.

Kurochkin Leonid Mikhailovich — Ph.D., Associate Professor, Associate Professor, Telematics Department of Institute of Applied Mathematics and Mechanics, St. Petersburg and

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Research interests: robotics, intelligent transport networks. The number of publications — 30. kurochkinl@spbstu.ru; 29, Polytechnicheskaya, 195251, St.Petersburg, Russian Federation; office phone: +7(921)3465767.

Sharagin Maksim Pavlovich — Ph.D. student, Telematics Department of Institute of Applied Mathematics and Mechanics, St. Petersburg and Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Research interests: machine learning, robotics. The number of publications — 3. msharagin@gmail.com; 29, Политехническая, 195251, Санкт-Петербург, Russian Federation; office phone: +7(812)5526521.

Zhang Lei — Ph.D., Professor, School of Computer Science and Software Engineering, East China Normal University (ECNU). Research interests: satellite navigation systems, robotics. The number of publications — 18. lzhang@ce.ecnu.edu.cn; 500, Dongchuan Rd., Minhang district, 200241, Шанхай, China; office phone: +86-18818223050.

Acknowledgment. State order, basic part: 2.9198.2017 / 8.9 Sustainable management of a heterogeneous grouping of cyber-physical objects in the conditions of space-time uncertainty.

References

- Schüler T. On ground-based GPS tropospheric delay estimation. Doctor's Thesis, Studiengang Geodäsie und Geoinformation. 2001. vol. 73. 364 p.
- Khutorova O.G. et al. [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 vysshih uchebnykh zavedenij. Radiofizika – Radiophysics and Quantum Electronics*. 2011. vol. 54. no. 1. pp. 1–8. (In Russ.).
- Popov S.G., Popov M.V. [Research methods to improve the accuracy of navigation]. *Materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem "Nedelya nauki SPbPU" [Materials of the scientific forum with international participation "Science Week SPbPU"]*. 2016. pp. 8–10. (In Russ.).
- Adrados C. et al. Global Positioning System (GPS) location accuracy improvement due to Selective Availability removal. *Comptes Rendus Biologies*. 2012. vol. 325. no. 2. pp. 165–170.
- Siejka Z. Validation of the accuracy and convergence time of real time kinematic results using a single galileo navigation system. *Sensors*. 2018. vol. 18(8). pp. 2412.
- Takács B., Siki Z., Markovits-Somogyi R. Extension of RTKLIP for the Calculation and Validation of Protection Levels. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 2017. vol. 42. 6 p.
- Suldi A.M., Samad A.M.A., Hashim H. Feasible study on establishment of a GPS reference station. 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications. 2012. pp. 362–366.
- Makarenko G.K., Aleshechkin A.M. [Study on filtering algorithms to determine the coordinates of an object by the signals of satellite navigation systems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of TUSUR journal*. 2012. vol. 2-2(26). pp. 15–18. (In Russ.).
- Gavrilov A.V. [Using the Kalman filter to solve the Problem of Refining the Coordinates UAV]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*. 2015. vol. 1-1. pp. 1784–1784. (In Russ.).
- Wans S.C. et al. Study on an intelligent fault-tolerant technique for multiple satellite configured navigation under highly dynamic conditions. *Science China Information Sciences*. 2011. vol. 54. pp. 529–541.

11. Hu J. et al. An extended Kalman filter and back propagation neural network algorithm positioning method based on anti-lock brake sensor and global navigation satellite system information. *Sensors*. vol. 18. no. 19. pp. 2753.
12. Ferrara N.G. et al. A new implementation of narrowband interference detection, characterization, and mitigation technique for a software-defined multi-GNSS receiver. *GPS Solutions*. 2018. vol. 22(4). pp. 106.
13. Skrypnik O.N., Nechaev E.E., Arefev R.O. [Construction and Analysis of GPS Accuracy Fields on the Basis of Hardware-Software Means NI GPS Simulation Toolkit]. *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviacii – Civil Aviation High TECHNOLOGIES*. 2014. vol. 209. pp. 5–12. (In Russ.).
14. Dvorkin V.V., Karutin S.N. [Precise Positioning According to GNSS Signal]. *Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologii – Siberian Journal of Science and Technology*. 2013. vol. 6(52). pp. 70–76. (In Russ.).
15. Guo J. et al. Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision Agriculture*. 2018. vol. 19(5). pp. 895–911.
16. Li X. et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*. 2015. vol. 89. no. 6. pp. 607–635.
17. Serapinas B.B. *Global'nye sistemy pozicionirovaniya* [Global Positioning Systems]. M.: IFK "Katalog". 2002. 105 p. (In Russ.).
18. Li X. et al. Precise Positioning with Current Multi-Constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Scientific Reports*. 2015. vol. 5. pp. 8328.
19. Xiaolei Y., Yongrong S., Jianye L., Jianfeng M. Fast Algorithm of Selecting Satellites for Multiple Satellite Integrated Navigation Engineering. 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering. 2009. vol. 5. pp. 121–125.
20. The International GNSS Service. Available at: <http://www.igs.org/> (accessed: 14.09.18).
21. Kurochkin L.M., Kurochkin M.A., Popov S.G., Popov M.V. [Result of experimental studies of positioning accuracy using various satellite navigation systems]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie – St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*. 2018. Issue 10. vol. 4. pp. 79–88. (In Russ.).