

УДК 621.396.988.6:629.19
DOI 10.17285/0869-7035.0044

А. А. КАРАУШ, Е. А. КАРАУШ, С. Ю. БУРЦЕВ, Ф. Р. СМИРНОВ

ОЦЕНИВАНИЕ СМЕЩЕНИЯ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ ПЕРЕВОЗИМОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ, НАХОДЯЩЕГОСЯ В ДВИЖЕНИИ, ПО СИГНАЛАМ ГНСС

Целью настоящей работы является определение смещения шкалы времени перевозимого квантового стандарта частоты, находящегося в движении, и исследование характеристик точности полученных оценок. Исследуемые оценки получены на основе измерений глобальных навигационных спутниковых систем и инерциальной навигационной системы. Представлены результаты как отдельной, так и совместной обработки результатов измерений двух систем. Произведена количественная оценка уменьшения погрешности определения смещения шкал времени за счет комплексирования измерений.

Ключевые слова: инерциальная навигационная система, глобальные навигационные спутниковые системы, стандарт времени и частоты, шкала времени, Precise Point Positioning.

Введение

В области метрологического обеспечения частотно-временных измерений существует ряд задач, которые решаются с использованием перевозимых квантовых стандартов частоты (ПКСЧ). К ним, в частности, относится оценивание разности шкал времени (ШВ) пространственно-удаленных эталонов времени путем их сравнения с ПКСЧ. Перевозимый стандарт имеет собственные параметры нестабильности: разность ШВ, отклонение и дрейф частоты, которые необходимо предварительно оценить с помощью государственного эталона времени и частоты (ГЭВЧ). Затем ПКСЧ физически перемещается к удаленному эталону времени и сличается с ним, после чего возвращается обратно на ГЭВЧ. Для расчета разности ШВ показания ПКСЧ экстраполируются на момент сличения с удаленным эталоном. При этом предполагается, что параметры нестабильности ПКСЧ за время перевозки не изменяются, что не всегда соответствует действительности. Квантовые стандарты частоты подвержены непредсказуемым изменениям ШВ, частоты и дрейфа, в том числе скачкообразным. При физическом перемещении стандарта вероятность проявления таких эффектов существенно повышается из-за неизбежной тряски, перепадов температуры и других факторов. Если после возвращения на ГЭВЧ обнаруживается существенное изменение параметров нестабильности, превышающее номинальные метрологические характеристики ПКСЧ,

Карапаш Артем Андреевич. Кандидат технических наук, научный сотрудник, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП «ВНИИФТРИ») (р.п. Менделеево, Солнечногорский район, Московская обл.).

Карапаш Екатерина Андреевна. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГУП «ВНИИФТРИ».

Бурцев Святослав Юрьевич. Кандидат технических наук, начальник лаборатории, ФГУП «ВНИИФТРИ».

Смирнов Федор Радиевич. Инженер, ФГУП «ВНИИФТРИ».

поездку необходимо повторить. Это ведет к значительным материально-техническим и времененным затратам, особенно с учетом повышения вероятности сбоя, обусловленного увеличением расстояния между сравниваемыми эталонами.

Таким образом, возникает проблема отслеживания параметров нестабильности ПКСЧ во время их движения в мобильной лаборатории на базе автомобиля с погрешностью, не превышающей 1 нс для разности ШВ и 10^{-15} для частоты на интервале измерения 1 сут. Возможность отслеживания ШВ с заданной погрешностью позволит идентифицировать и исследовать значительные сбои ПКСЧ во время движения, а для некоторых сценариев сличения ШВ, не требующих наивысшей точности, – скорректировать погрешность, возникающую по причине указанного сбоя. Наиболее подходящим вариантом решения проблемы, требующим минимальной модификации лаборатории, является использование ГНСС-приемника, синхронизированного по частоте и моменту времени с перевозимым стандартом. При этом следует учитывать, что оценивание смещения шкалы времени по сигналам ГНСС неотделимо от задачи определения координат навигационной аппаратуры потребителя (НАП). Погрешность оценивания параметров нестабильности стандартов по данным ГНСС-измерений напрямую связана с погрешностью определения координат [1]. Точность координатно-временных определений с помощью ГНСС-измерений прежде всего зависит от используемых методов их обработки.

Наиболее точные результаты можно получить путем обработки измерений фазы несущей, а также дифференциальным методом с двумя или более ГНСС-приемниками [1–3]. При этом необходимо осуществлять непрерывное слежение за сигналами навигационных космических аппаратов (НКА). Значение погрешности координатно-временных определений возрастает в случае снижения уровня, потери или отражения сигнала от окружающих объектов [3]. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что существующие методы на основе технологии Precise Point Positioning не позволяют решить задачу отслеживания параметров нестабильности ПКСЧ с необходимой точностью, поскольку ГНСС-приемник регулярно теряет сигналы от спутников. Такие потери происходят при движении под мостами и эстакадами и особенно часто – в условиях плотной городской застройки. При потере слежения за фазой несущей оценка смещения ШВ претерпевает разрыв по причине того, что начальные значения для отдельных сегментов измерений могут быть оценены только с помощью усреднения кодовых измерений, обладающих существенно худшими характеристиками точности.

Даже при целочисленном разрешении фазовой неоднозначности выбор начального значения смещения ШВ имеет некоторую произвольность: характеристики точности кодовых измерений не позволяют однозначно определить значение целого количества фазовых циклов – оно произвольно выбирается из возможных значений в пределах нескольких циклов. При непрерывных длительных измерениях это не представляет проблем: оценка ШВ оказывается смещенной относительно истинного значения, но ход ШВ от начального до конечного моментов известен с высокой точностью, и возможно исследование кратковременной нестабильности КСЧ. При частых (иногда каждые несколько минут) разрывах фазовых измерений во время движения совместить отдельные сегменты непрерывных фазовых измерений не представляется возможным: погрешность выбора начального значения за счет шума кодовых измерений неотличима от вероятного скачка в ШВ самого мобильного стандарта.

В связи с этим для достижения наивысшей точности и дальнейшего уменьшения погрешности до уровня менее 100 пс необходимо обеспечить соединение отдельных сегментов фазовых измерений после перерывов в приеме сигнала на протяжении всего маршрута следования. Под соединением сегментов понимается компенсация фазовых разрывов, то есть определение целого числа циклов фазового скачка и его исправление. Хотя при этом и не удастся полностью восстановить непрерывность ШВ ПКСЧ, однако это позволит избежать скачков и разрывов в оценках ШВ после пропадания ГНСС-сигнала. В случае определения хода ПКСЧ с такой точностью появляется возможность не только зафиксировать факт изменения параметров нестабильности ПКСЧ, но и скомпенсировать большинство подобных сбоев.

Если точно знать расхождение ПКСЧ с ГЭВЧ в начальный момент времени и его изменение на протяжении всего маршрута, то не составит труда вычислить и ввести соответствующую поправку на момент сличения с удаленным эталоном. Необходимо отметить, что сличение часов с помощью ПКСЧ предполагает апостериорные расчеты, связанные с особенностями функционирования ГЭВЧ. Вследствие этого задержка до двух дней в получении оценок хода ПКСЧ за время движения является допустимой и жестких требований для работы в режиме реального времени нет. Авторы полагают, что привлечение данных инерциальной навигационной системы (ИНС) поможет существенно сократить область поиска целого числа периодов и решить задачу исправления фазовых разрывов. В настоящей работе рассматривается вариант решения этой задачи с пониженными к изложенным выше требованиями к точности. На данном этапе в целях отработки алгоритма также понижены требования к оперативности: используются высокоточные эфемериды, доступные с задержкой в две недели. В дальнейшем предполагается использование более оперативных продуктов.

Для обеспечения непрерывности координатно-временных определений и решения задачи сравнения ШВ с погрешностью 1 нс предлагается дополнять измерения ГНСС данными ИНС. В отличие от ГНСС функционирование ИНС не зависит от внешних электромагнитных сигналов и является автономным, т.е. окружающая помеховая обстановка не влияет на погрешность вырабатываемых ими данных. Более того, ИНС обладают малыми погрешностями в выработке координат на коротких интервалах времени и могут предоставлять информацию о местоположении непрерывно, т.е. с высокой частотой [3]. Основным недостатком ИНС является ухудшение ее характеристик со временем – для получения точных результатов определения местоположения объекта необходима периодическая коррекция вырабатываемых ИНС координат. Для этой цели могут использоваться результаты обработки измерений ГНСС.

Существует ряд публикаций на тему совместной обработки данных ИНС и ГНСС в целях повышения точности определения координат. Такие исследования в основном посвящены тесно связанной обработке данных ИНС и ГНСС с использованием фильтра Калмана (ФК), где ИНС является опорной системой для ГНСС [3–7]. Кроме того, исследователей результатов совместной обработки данных ИНС и ГНСС интересуют координаты [8, 9] и параметры ориентации [10], а в настоящей статье основное внимание уделяется определению шкалы времени перевозимого стандарта частоты.

В статье приведен случай совместного применения ГНСС и ИНС для определения смещения шкалы времени перевозимого стандарта в движении. ИНС служила вспомогательным источником координат для основного решения по ГНСС. Такую

систему можно классифицировать как слабосвязанную, поскольку данные ИНС не используются при формировании ГНСС-измерений, а только в виде готового координатного решения. Статья посвящена прежде всего исследованию возможности оценки смещения шкалы времени перевозимого стандарта частоты, находящегося в движении, с помощью измерений ГНСС и данных ИНС и определению характеристик точности такой оценки.

1. Задача оценивания смещения шкалы времени часов ПКСЧ по сигналам ГНСС

Ключевую роль при оценивании смещения шкалы времени перевозимого стандарта частоты играет точность определения его координат. ИНС определяет координаты в момент потери сигналов ГНСС, что позволяет не ухудшать оценку смещения шкалы времени стандарта частоты. Измерения ГНСС и ИНС могут дополнять друг друга в условиях движения.

По измерениям ГНСС решается задача определения координат и шкалы времени НАП. Точность таких определений зависит от способа проведения и обработки измерений. Приведем некоторые из них.

Real Time Kinematic (RTK). К преимуществам данного метода относится высокая точность координатных определений, однако его применение возможно только с использованием опорной станции и является целесообразным лишь на коротких базовых линиях, так как погрешность определения координат возрастает с увеличением расстояния между опорной станцией и НАП [2]. В качестве исходной информации в методе RTK используются вторые разности кодовых и фазовых измерений. Вследствие этого в решении по методу RTK отсутствует информация о шкале времени приемника, поскольку она исчезает при формировании вторых разностей. Таким образом, метод RTK не подходит в полной мере для решения поставленных задач и не будет исследоваться.

Относительное позиционирование по первым разностям кодовых и фазовых измерений. Этот метод обладает преимуществами RTK и не требует дополнительного решения для оценки смещения шкалы времени часов [2], однако при этом необходимы измерения от двух и более приемников. Поскольку количество одновременно наблюдаемых спутников уменьшается с увеличением расстояния между мобильной лабораторией и опорной станцией, обработка измерений в реальном времени затруднена из-за необходимости передавать большой объем данных.

Метод точного позиционирования (Precise Point Positioning – PPP). Ключевое преимущество метода PPP – это использование абсолютных ГНСС-измерений, решение без опорной станции, возможность реализации вычислений в реальном времени. В этом случае используются измерения по коду и фазе несущей сигнала ГНСС на двух частотах L1 и L2 с привлечением точной эфемеридно-временной информации. Погрешность оценивания смещения шкалы времени часов методом PPP составляет порядка 1 нс, погрешность определения координат может составлять менее 10 см [3, 11]. Основной недостаток – медленная сходимость решения, для оценки фазовой неоднозначности и достижения необходимой точности требуются длительные непрерывные измерения. Таким образом, непрерывность является важным условием при проведении измерений фазовых наблюдений ГНСС, поскольку при каждой

потере сигнала время сходимости решения начинает отсчитываться заново. Необходимо по крайней мере 15 мин непрерывного слежения за фазой несущей сигнала, чтобы оценки координат и шкалы времени НАП удовлетворяли требуемой точности. На протяжении интервала сходимости оценки являются недостоверными и не могут использоваться [12]. При частой потере сигналов периоды недостоверности оценок составляют существенную часть общего интервала наблюдений, что не позволяет достичь требуемой погрешности 1 нс.

В настоящее время PPP считается наиболее эффективным подходом в статическом и кинематическом позиционировании [11]. Непрерывность наблюдений сигналов ГНСС в задаче оценивания смещения шкалы времени часов не всегда выполняется, особенно если транспортное средство движется в туннеле или по лесному массиву. В связи с этим позиционирование в сложных городских условиях все еще является серьезной проблемой.

Реализация метода PPP, разработанная во ВНИИФТРИ, позволяет относительно легко включить измерения координат от ИНС в общую систему уравнений. Это обстоятельство существенно уменьшило трудоемкость доработки имеющегося программного обеспечения (ПО). По вышеозначенным причинам PPP был выбран как основной метод исследования. Авторы проводили сравнение оценок ШВ, полученных PPP по данным ГНСС-измерений и по данным комплексирования ГНСС с помощью ИНС.

2. Цель и описание эксперимента

Для исследования поставленных вопросов авторами был проведен натурный эксперимент, целью которого было проверить необходимость и достаточность дополнения данных ГНСС-приемника информацией от ИНС для достижения требуемых точностных характеристик оценок ШВ ПКСЧ, находящихся в движении.

Эксперимент проводился с использованием навигационного приемника Septentrio PolarX5TR и интегрированной инерциально-спутниковой системы SPAN SE-LCI (NovAtel), размещенных на автомобиле-лаборатории. Приемник Septentrio PolarX5TR оборудован входами синхронизации с внешними сигналами времени и частоты. В автомобиле также был размещен активный водородный стандарт частоты. Несмотря на то что интегрированная система SPAN SE-LCI оснащена навигационным двухчастотным приемником, для получения оценок ШВ обрабатывались измерения от приемника Septentrio PolarX5TR. Использовать ГНСС-приемник системы SPAN SE-LCI в эксперименте было нельзя, поскольку он не обеспечивает подключение опорных сигналов времени и частоты (вход 10 МГц и 1PPS), а значит, не может использоваться для определения характеристик нестабильности ПКСЧ. Приемник PolarX5TR обладает рядом преимуществ: отслеживает сигналы ГНСС GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, оборудован полноразмерной антенной, позволяет получать измерения с низким уровнем шума. При этом данные ГНСС-приемника системы SPAN SE-LCI применялись для коррекции результатов функционирования инерциальной системы при обработке измерений в ПО, поставляемом с ИНС.

Измерения проводились на территории Московской области. Время проведения эксперимента составило 4 часа, скорость транспортного средства варьировалась в диапазоне 20–60 км/ч, общая пройденная дистанция – около 100 км.

Одновременно обрабатывались данные двух идентичных ГНСС-приемников:

- 1) один из них находился в движущемся автомобиле и был подключен к сигналам перевозимого стандарта частоты. Было проведено 2 варианта обработки – с использованием только ГНСС-измерений и комплексированных с ИНС;
- 2) второй находился во ВНИИФТИ и был подключен к сигналам ГЭВЧ.

В результате обработки была определена разность шкал времени ПКСЧ и ГЭВЧ. На основе этой разницы рассчитывалась девиация Аллана, которая была выбрана качестве характеристики точности. Проводилось сравнение истинной девиации Аллана и рассчитанной на основе оценок смещения шкал времени с использованием данных ГНСС и данных ГНСС + ИНС. Под истинной понимается девиация Аллана мобильного стандарта частоты в состоянии покоя, рассчитанная на основе прямых лабораторных измерений разности ШВ стандарта и ГЭВЧ.

3. Обработка измерений

В ходе эксперимента привлекались кодовые псевдодальномерные измерения и измерения по фазе несущей частоты сигнала ГНСС. Псевдодальномерные измерения представляют собой время, необходимое для прохождения сигнала от НКА до приемника, выраженное в единицах длины (1). Измерения по фазе несущей представляют собой разность между фазой сигнала в момент его приема НАП и фазой сигнала в момент его передачи с борта НКА (2). Когда диапазон между фазой НАП и фазой сигнала НКА изменяется более чем на цикл, приемник считает циклы и обеспечивает непрерывное измерение. Из-за короткой длины волны фазы несущей (19-25 см) такие измерения точнее, чем псевдодальномерные, но неоднозначны из-за неизвестного целого числа длин волн [1-3]:

$$P = \rho(u_{sat}, u_{res}) + c\Delta T_{sat} - c\Delta T_{res}^G + p_{ion} + p_{trop} + p_{MP} + \varepsilon_P, \quad (1)$$

$$\Phi = \rho(u_{sat}, u_{res}) + c\Delta T_{sat} - c\Delta T_{res}^G + \lambda N - p_{ion} + p_{trop} + p_{M\Phi} + \varepsilon_\Phi, \quad (2)$$

где P – псевдодальномерные измерения;

Φ – измерения по фазе несущей;

u_{sat}, u_{res} – координаты НКА и НАП соответственно;

$\rho(u_{sat}, u_{res})$ – геометрическая дальность между НКА и НАП;

c – скорость света;

ΔT_{sat} – смещение ШВ НКА относительно системной ШВ ГНСС;

ΔT_{res}^G – смещение ШВ НАП относительно системной ШВ соответствующей ГНСС;

p_{ion} – ионосферная задержка сигнала;

p_{trop} – тропосферная задержка сигнала;

$p_{MP}, p_{M\Phi}$ – многолучевость псевдодальномерных и фазовых измерений;

$\varepsilon_P, \varepsilon_\Phi$ – погрешность псевдодальномерных и фазовых измерений;

λN – фазовая неоднозначность измерений [3].

Сложность в использовании фазовых измерений заключается в произвольном изменении неоднозначности λN каждый раз, когда приемник теряет сигнал, порождая скачки или разрывы в измерениях. Разрешение фазовой неоднозначности λN является ключевой задачей для обеспечения высокоточных координатно-временных определений.

Для определения орбиты и уходов бортовых часов НКА ГНСС привлекается точная эфемеридно-временная информация. В число оцениваемых параметров входят координаты и шкала времени НАП. Включение в решение измерений фазы несущей в дополнение к псевдодальноти требует введения также фазовых неопределенностей, что вызывает довольно длительную начальную сходимость в решении PPP. Необходимы также высокоточный расчет воздействия различных влияющих факторов с помощью сложных моделей [13, 14] и тщательная фильтрация данных для обнаружения выбросов и разрывов измерений фазы несущей. С помощью двухчастотных наблюдений устраняется ионосферная задержка первого порядка p_{ion} путем формирования безыоносферной комбинации [13]. Тропосферная задержка p_{trop} представляется в следующем виде:

$$p_{trop} = trop_{dry} \cdot m_{dry}(a) + trop_{wet} \cdot m_{wet}(a),$$

где $trop_{dry}$ и $trop_{wet}$ – соответственно гидростатическая и влажная зенитная тропосферная задержка; $m_{dry}(a)$ и $m_{wet}(a)$ – гидростатическая и влажная картирующие функции; a – угол видимости спутника над горизонтом. Картирующие функции зависят от положения станции и времени года и могут быть рассчитаны по формулам, представленным в [14]. Гидростатическая зенитная задержка также рассчитывается с высокой точностью в отличие от влажной зенитной задержки, которая входит в состав оцениваемых параметров [11, 13–15].

Метод PPP предполагает высокоточный расчет и компенсацию влияющих на время распространения сигнала факторов для вычисления априорных невязок измерений, которые являются исходной информацией для оценивания неизвестных параметров. Для решения задачи оценивания в работе используется ФК. В число неизвестных из уравнений (1) и (2) входят координаты и смещение ШВ НАП, влажная составляющая тропосферной задержки и фазовые неоднозначности измерений. Вектор оцениваемых параметров имеет следующий вид:

$$X = (u_{res}(t) \quad \Delta T_{res}(t) \quad trop_{wet}(t) \lambda_c B_1 \quad \dots \quad \lambda_c B_n \quad G)^T, \quad (3)$$

где $u_{res}(t) = (x_{res} \quad y_{res} \quad z_{res})^T$ – вектор координат приемника на момент времени t ; $\Delta T_{res}(t)$ – смещение ШВ приемника относительно опорной ШВ на момент времени t ; $trop_{wet}(t)$ – влажная составляющая зенитной тропосферной задержки навигационного сигнала на момент времени t ; λ_c – длина волны безыоносферной комбинации; B_i – нецелочисленная (дробная – англ. “float”) фазовая неоднозначность для безыоносферной комбинации измерений i -го НКА; n – число НКА; G – вектор $(g-1) \times 1$, содержащий межсистемные задержки; g – количество используемых ГНСС. Опорной ШВ для вычисления $\Delta T_{res}(t)$ является ШВ используемых высокоточных эфемеридно-временных поправок. Межсистемные задержки ГНСС при этом полагались постоянными на всем интервале обработки.

Уравнения прогноза для фильтра Калмана задаются следующими уравнениями:

$$X_{k|k-1} = FX_{k-1|k-1},$$

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q_k,$$

где $X_{k-1|k-1}$ – оценка вектора состояния на шаге $k-1$; $P_{k-1|k-1}$ – ковариационная матрица на шаге $k-1$; F – матрица эволюции процесса; Q_k – ковариационная матрица порождающего шума в уравнениях динамики для вектора состояния (3). Первые пять параметров вектора X являются динамическими, и соответствующие элементы матриц F и Q_k задаются следующим образом:

$$F_{[1..5, 1..5]} = \text{diag}(1, 1, 1, 0, 1),$$

$$Q_{k,[1..5,1..5]} = \text{diag}(\tau \cdot c_p, \tau \cdot c_p, \tau \cdot c_p, \sigma_c^2, \tau \cdot c_t),$$

где τ – интервал дискретизации уравнений динамики; $c_p = (30 \text{ м})^2/\text{с}$ – производная дисперсии шума процесса движения автомобиля; $\sigma_c = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ – среднеквадратическое отклонение шума смещения шкалы времени; $c_t = (5 \text{ мм})^2/\text{час}$ – производная дисперсии шума процесса для зенитной тропосферной задержки. Различие динамики движения автомобиля в вертикальном и горизонтальных направлениях в решении не учитывалось.

Остальные параметры во времени неизменны, соответствующие блоки матриц F и Q_k тривиальны и представляют собой единичную диагональную и нулевую матрицы соответственно. Как следует из описания, для координат и зенитной тропосферной задержки применена модель случайного блуждания, для шкалы времени – модель белого шума с большой дисперсией. Фазовая неоднозначность также рассматривается как постоянная для непрерывных сеансов измерений, при разрыве фазы применяется модель белого шума с $\sigma = 1 \cdot 10^5 \text{ м}$. Интервал дискретизации уравнений динамики обычно равен интервалу дискретизации измерений и при пропадании сигнала ГНСС увеличивается в соответствии с интервалом отсутствия измерений.

В качестве измерений при решении задачи оценивания в ФК используются невязки кодовых и фазовых измерений наблюдаемых спутников:

$$Y = (dP_1(t) \ d\Phi_1(t)) \ \dots \ dP_n(t) \ d\Phi_n(t))^T,$$

где dP_i – невязка безыносферной комбинация псевдодальномерных измерений i -го НКА на момент времени t ; $d\Phi_i$ – невязка безыносферной комбинации фазовых измерений i -го НКА на момент времени t . Невязка измерений рассчитывается как разность измеренного и ожидаемого значения, вычисленного на основе первоначального приближения вектора оцениваемых параметров на каждом шаге ФК.

С использованием информации о положениях спутников и приемника рассчитывается матрица наблюдений H , содержащая частные производные измерений по неизвестным параметрам. При этом положение приемника определяется на основе информации с предыдущего шага ФК или с помощью итерационного процесса, начиная с некоторого начального приближения. Таким же образом рассчитывается ковариационная матрица измерений R_k , при этом предполагается, что все измерения некоррелированы, номинальное стандартное отклонение кодовых измерений равно 1 м, а фазовых – 1 см. Дисперсия измерений масштабируется в зависимости от возведения спутника над горизонтом и обратно пропорциональна функции $\sin(a)$.

Для повышения точности решения в условиях нарушения непрерывности приема сигналов данные ГНСС дополняются данными ИНС. Используемая ИНС является интегрированной и состоит из собственно инерциального блока и отдельного

ГНСС-приемника. Инерциальный блок содержит три акселерометра и три гироскопа, установленные на ортогональной триаде. На основе их измерений ИНС позволяет оценивать изменение положения объекта в пространстве. Приемник ГНСС системы SPAN SE-LCI используется для коррекции измерений инерциального блока и позволяет избежать накопления погрешностей, присущих инерциальным системам. Кроме того, ГНСС-приемник позволяет привязать моменты измерений ИНС к шкале времени UTC с погрешностью, не превышающей 1 мкс. Такая погрешность полностью удовлетворяет требованиям задачи: в предположении, что максимальная скорость автомобиля составляет около 100 км/ч, погрешность за счет асинхронности измерений ИНС и Septentrio PolarX5TR будет много меньше 1 мм. Финальный результат работы ИНС получается путем постобработки измерений с помощью специального ПО Inertial Explorer [16].

Измерения ИНС не подвержены воздействию факторов, влияющих на прием ГНСС-сигналов, позволяют получить непрерывное решение и могут быть использованы для уменьшения периода сходимости ГНСС-решения. Для обеспечения требуемых характеристик точности необходима ИНС высокого класса точности с накоплением погрешности координат не более 10 см за 10 с отсутствия ГНСС-сигнала.

ИНС, корректируемая по данным внутреннего приемника, использовалась в исследовании только как дополнительный источник информации о координатах. Значения координат, полученные с помощью ИНС, комбинировались с ГНСС-измерениями приемника PolarX5TR путем добавления в ФК в виде измерений следующего вида:

$$\begin{aligned} x_{\text{iner}}(t) &= x_{\text{res}}(t) + \delta_x(t), \\ y_{\text{iner}}(t) &= y_{\text{res}}(t) + \delta_y(t), \\ z_{\text{iner}}(t) &= z_{\text{res}}(t) + \delta_z(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где $(x, y, z)_{\text{res}}$ – неизвестные координаты из уравнения (3); $(x, y, z)_{\text{iner}}$ – измерения ИНС; $\delta_{(x, y, z)}$ – ошибка измерений ИНС. Для этого обсуждаемая выше матрица наблюдений H на каждом шаге дополнялась тремя строками, соответствующими уравнению (4). Размерность ковариационной матрицы измерений R_k также увеличивается на 3, а диагональ дополняется тремя элементами, описывающими неопределенность координат, полученных от ИНС. При этом предполагается, что погрешность измерений $\delta_{(x, y, z)}$ может быть описана с помощью модели белого шума. Диагональные элементы матрицы R_k устанавливаются равными дисперсиям соответствующих погрешностей измерений ИНС, которые экспоненциально нарастают в зависимости от времени отсутствия ГНСС-сигнала. Значение дисперсии рассчитывается в соответствии со спецификациями производителя, ковариации параметров при этом полагаются равными нулю.

Таким образом, осуществлялось комбинирование данных ГНСС и ИНС с учетом их неопределенности для получения общих оценок. После потери ГНСС-сигнала вес измерений ИНС был существенно выше, и координаты совместного решения практически соответствовали координатам, вырабатываемым ИНС. После восстановления ГНСС-сигнала и завершения периода сходимости ГНСС-определения координат превалировали над данными ИНС, и дополнительная информация от ИНС мало влияла на общее решение.

4. Результаты эксперимента

На рис. 1 представлена траектория движения автомобиля с НАП, перевозимым стандартом частоты и ИНС. Маршрут проходил через ряд населенных пунктов Московской области (п. Менделеево, п. Сходня, г. Зеленоград, д. Поварово), для которых характерны высокие здания, блокирующие сигналы ГНСС и создающие условия многолучевости. Во время движения по туннелям, под мостами и через лесные массивы также наблюдались потери сигналов некоторых или всех НКА (рис. 2). В таком случае получение ГНСС-решения невозможно.

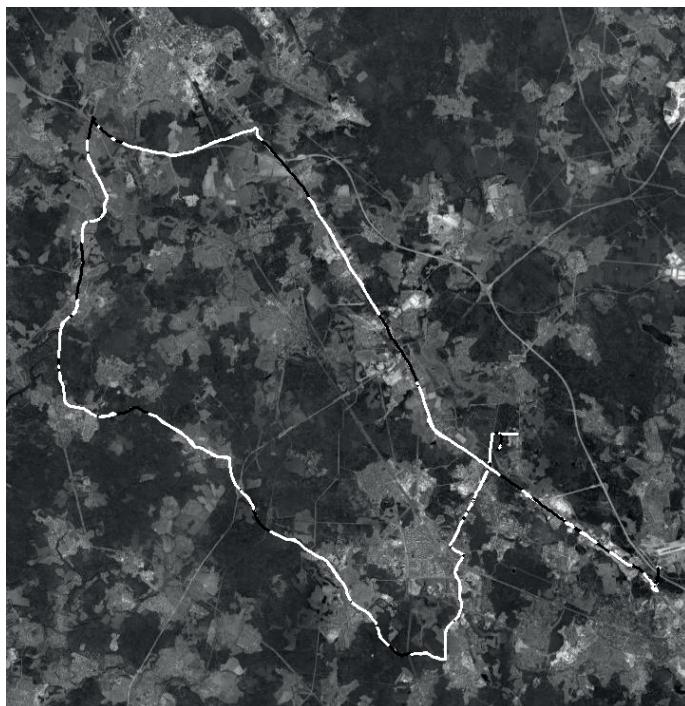


Рис. 1. Траектория движения транспортного средства со стандартом частоты, Московская область, 2019:
○ – измерения ГНСС; ● – измерения ИНС



Рис. 2. Пример потери сигналов в различных условиях:
а – проезд через лес; б – проезд в туннеле под Ленинградским шоссе;
в – проезд в городском каньоне с высокими зданиями, г. Зеленоград.
○ – измерения ГНСС, ● – измерения ИНС

Приемник фиксировал кодовые и фазовые измерения ГНСС с периодом в 1 с. Для обработки измерений ГНСС использовалось разработанное специальное программное обеспечение, реализующее метод PPP. В качестве эфемеридно-временной информации применялись финальные продукты аналитического центра CODE (Center for Orbit Determination in Europe) [17]. В число обрабатываемых измерений были включены данные систем ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Galileo (Евросоюз).

Измерения ИНС (x, y, z)_{iner} были получены путем постобработки исходной информации с помощью ПО, поставляемого производителем. При этом во время всего эксперимента в SPAN SE-LCI был установлен режим коррекции по измерениям ГНСС-приемника системы, а в качестве эфемеридно-временной информации использовались финальные продукты CODE. По спецификации производителя погрешность определения положения в пространстве при этом составляет порядка 1 см для горизонтальных координат и 2 см для высоты в условиях приема сигнала ГНСС. В случае отсутствия сигнала ГНСС в течение 10 с погрешность составляет 2 см для всех координат. При этом в ходе эксперимента максимальный интервал отсутствия ГНСС-сигнала не превышал 7 с.

Если использовались только сигналы ГНСС, то их многократное пропадание приводило к разрыву фазовых измерений, повторной инициализации фильтра и, следовательно, к снижению точности позиционирования и определения смещения шкалы времени. За время движения встречались случаи частой потери сигналов ГНСС (более 10 раз за 30 мин), что повлекло за собой существенную деградацию точности решения.

Для определения более точных значений ΔT_{res} координаты, полученные от ИНС, добавлялись в фильтр Калмана как псевдоизмерения в дополнение к данным ГНСС. В результате этого были рассчитаны оценки координат приемника и положения опорной шкалы времени на всем маршруте следования на основе совместных данных ГНСС и ИНС.

На рис. 3 представлен фрагмент графика оценок шкалы времени, полученных только по данным ГНСС и по результатам совместной обработки ГНСС и ИНС. В моменты потери сигналов в оценках по ГНСС появляются разрывы ШВ, величина скачка при этом составляет в отдельных случаях до 50 нс. Видно, что для результатов совместной обработки разрывы существенно меньше, а иногда вовсе незаметны на графике.

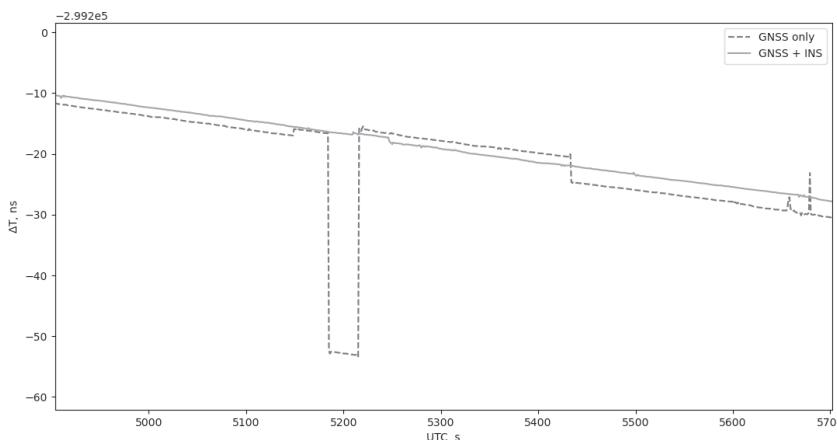


Рис. 3. Оценка отклонения шкалы времени перевозимого стандарта частоты:

— только по сигналам ГНСС (GNSS only);

— комплексирование ГНСС и инерциальной навигационной системой (GNSS + INS)

Основой для расчета характеристик точности методов были оценки смещения ШВ мобильного стандарта относительно ГЭВЧ, поправленные на постоянное смещение частоты:

$$\Delta T(t) = \Delta T_{res}^m(t) - \Delta T_{res}^r(t) - (t - t_0) \cdot \Delta F,$$

где ΔT_{res}^m , ΔT_{res}^r – оценка смещения ШВ мобильного стандарта и ГЭВЧ соответственно; ΔF – постоянное смещение частоты мобильного стандарта; t_0 – начальный момент времени. Такое преобразование не изменяет девиацию Аллана, которая выбрана в исследовании основной мерой погрешности. Постоянное смещение частоты было определено заранее в ходе лабораторных измерений на ГЭВЧ. По полученным оценкам ΔT рассчитывалась первая разность, то есть разница смещений ШВ в соседние моменты времени:

$$V(t) = \Delta T(t + \Delta t) - \Delta T(t),$$

где Δt – шаг оценки ШВ.

Для оценки качества решений были определены следующие величины:

- 1) доступность решения – процент времени в пределах длительности эксперимента, когда метод позволял получить решение;
- 2) максимальное по модулю значение $V(t)$;
- 3) среднеквадратическое значение $V(t)$;
- 4) Q_{99} – 99-й процентиль модуля $V(t)$;
- 5) девиация Аллана ΔT .

Статистика решений представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики методов обработки измерений

Метод	Доступность	$\max(V(t))$, нс	СКО, нс	Q_{99} , нс
ИНС	100% (только координаты)	–	–	–
ГНСС	96,04%	52,6	1,34	1,21
ГНСС + ИНС	98,95%	12,3	0,37	0,52

Используемый в эксперименте активный водородный стандарт частоты на интервалах времени до 10 с имеет относительную нестабильность порядка 3×10^{-13} . Таким образом, при условии штатного равномерного хода часов можно считать, что $V(t)$ характеризует только погрешность метода расчета оценок, поскольку собственная нестабильность часов пренебрежимо мала. Q_{99} в этом случае может рассматриваться как случайная погрешность метода.

На рис. 4 представлены графики девиации Аллана, которая выбрана в исследовании мерой погрешности. Треугольными маркерами обозначена истинная девиация, полученная в лаборатории. Путем сравнения с этими данными определяется погрешность метода определения смещения шкалы времени перевозимого стандарта частоты. Видно, что комплексирование данных ГНСС и ИНС по сравнению с использова-

нием только данных ГНСС позволяет в 5-8 раз уменьшить девиацию Аллана за счет применения дополнительной измерительной информации о координатах.

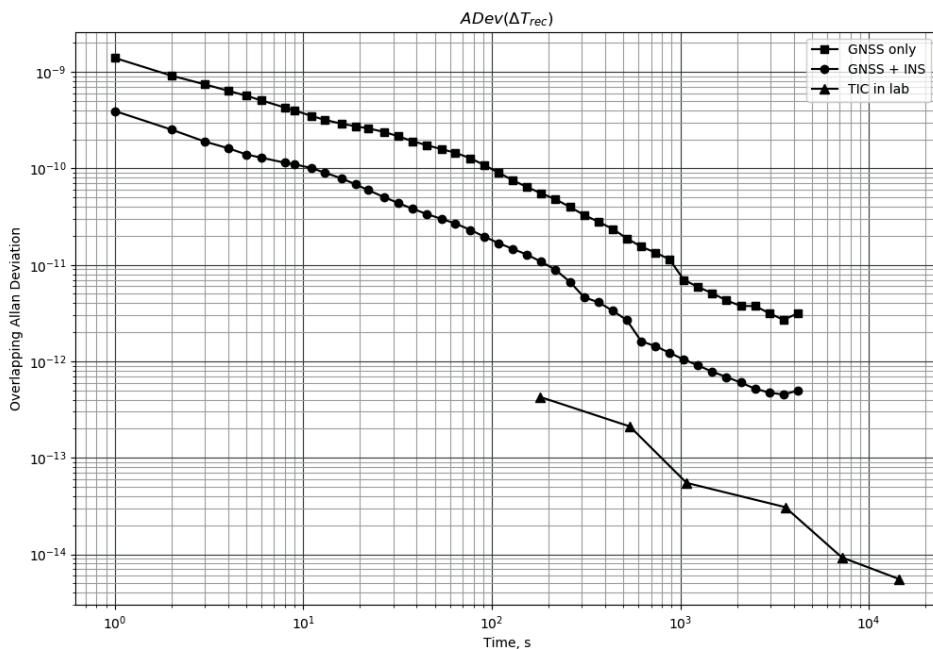


Рис. 4. Девиация Аллана по оценкам шкалы времени:

- – только по сигналам ГНСС (GNSS only);
- – комплексирование ГНСС и инерциальной навигационной системой (GNSS + INS);
- ▲ – лабораторные измерения (TIC in lab)

Анализируя данные табл. 1, можно сделать вывод об уменьшении случайной погрешности в 2,5 раза и достижении уровня порядка 0,5 нс, что удовлетворяет предъявляемым требованиям. Отметим также некоторое увеличение доступности решения. Разница в характеристиках методов, полученных на основе анализа девиации Аллана и Q_{99} , объясняется большей чувствительностью девиации Аллана к отдельным резким выбросам. Кроме того, можно сделать вывод о том, что распределение величины $V(t)$ отличается от нормального, поскольку максимальные выбросы для обоих методов превышают 30 стандартных отклонений. По мнению авторов, такие выбросы связаны с существенным отклонением оценок координат от истинных значений, в том числе при совместном использовании ГНСС и ИНС.

Для проверки соответствия характеристик точности ИНС заявленным производителем был исследован период стоянки транспортного средства, во время которого наблюдался долговременный непрерывный и устойчивый прием ГНСС-сигнала. За это время была произведена выборка оценок долготы и широты, полученная на основе данных только ГНСС и только ИНС. Анализировались отклонения оценок от среднего положения на стоянке, которые представлены на рис. 5. Статистические характеристики оценок координат, полученных ГНСС и ИНС, представлены в табл. 2. Видно, что в условиях стоянки и устойчивого приема ГНСС-сигнала точность спутниковой навигации превосходит точность ИНС, при этом погрешность ИНС существенно превосходит паспортные значения. Это позволяет предположить, что во время движения и неуверенного приема ГНСС-сигнала ИНС тоже не обеспе-

чиваеет декларируемой точности, что выражается в скачках до 12 нс в оценках ШВ совместного решения.

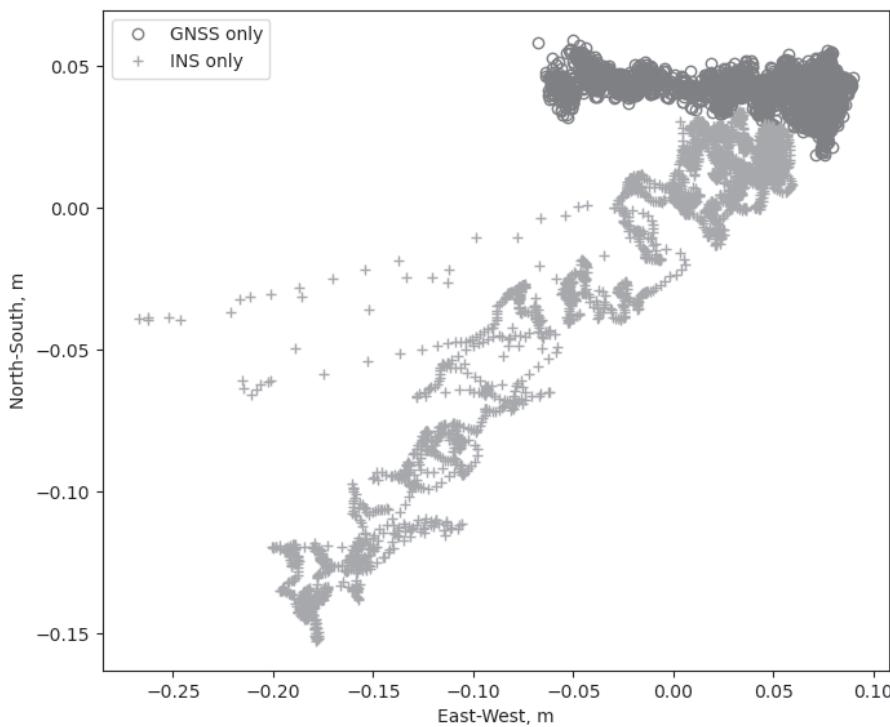


Рис. 5. Отклонение координат от среднего положения на стоянке:

- – только по измерениям ГНСС (GNSS only);
- + – только по измерениям ИНС (INS only)

Таблица 2

Характеристики точности оценок широты и долготы, полученных исследуемыми методами

Метод	СКО		Размах	
	по широте, см	по долготе, см	по широте, см	по долготе, см
ИНС	5,6	8,2	18,7	32,6
ГНСС	0,6	4,1	4,1	15,7

Заключение

Результаты эксперимента показали, что существующие методы сличения шкал времени по каналам ГНСС не позволяют оценивать расхождения стандартов частоты во время движения с удовлетворительной погрешностью. С помощью комплексирования данных ГНСС и измерений ИНС может быть решена ключевая проблема – парирование результатов потери/разрыва данных ГНСС и, как следствие, деградации решения и невозможности оценить положение шкалы времени на момент потери данных. Анализ девиации Аллана показывает, что привлечение дополнительной информации

в виде координат, полученных ИНС, позволяет уменьшить погрешность оценок смещения шкалы времени часов в 5-8 раз. Вместе с тем отдельные выбросы оценок достигают величины 12 нс, что, по мнению авторов, обусловлено высокой погрешностью координат, предоставляемых ИНС в некоторые моменты времени.

В дальнейшем представляются перспективными следующие направления решения задачи оценивания смещения шкалы времени стандарта частоты в движении:

- взаимодействие с производителем ИНС для выяснения причин и способов решения проблем с погрешностью определения координат;
- использование информации от ИНС для исправления фазовых разрывов;
- исследование возможности применения целочисленного разрешения фазовой неоднозначности в динамическом режиме работы НАП;
- реализация решения рассматриваемой задачи в режиме реального времени.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта №19-29-11023.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. М.: Радиотехника, 2008. С. 328.
2. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J., Global Positioning System. Theory and Practice, Fifth, revised edition, 2001, p. 404.
3. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (Springer Handbooks), Editors P. Teunissen, O. Montenbruck, 1 st ed., 2017, 1327 p.
4. Шатилов А.Ю., Нагин И.А. Тесно связанный алгоритм комплексирования НАП СРНС и многоцелевой ИНС // Радиотехника. 2012. № 6. С. 118–126.
5. Горев П.А., Костиков В.Г. Метод обработки фазовых измерений глобальной спутниковой навигационной системы с использованием данных инерциальной навигационной системы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 11. С. 757–764. DOI: 10.17587/mau.16.757-764.
6. Аль Битар Н., Гаврилов А.И. Сравнительный анализ алгоритмов комплексирования в слабосвязанной инерциально-спутниковой системе на основе обработки реальных данных // Гирокопия и навигация. 2019. Т. 27. №3 (106). С. 31–52.
7. Иванов В.Ф., Кошкаров А.С. [Электронный ресурс] Повышение помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС за счет комплексирования с инерциальными навигационными датчиками // Труды МАИ. 2015. №93. URL: trudymai.ru/published.php?ID=80455.
8. Рот Й., Шайх Т., Троммер Г.Ф. Метод определения положения транспортного средства, основанный на кооперативном использовании данных спутниковой навигационной системы // Гирокопия и навигация, 2012. №3 (78). С. 18–35.
9. Zhang, Y., Gao, Y., Integration of INS and Un-Differenced GPS Measurements for Precise Position and Attitude Determination. The Journal of Navigation, 2008, vol. 61, pp. 87-97. DOI: 10.1017/S0373463307004432.
10. Емельянцев Г.И., Блажнов Б.А., Степанов А.П. Об использовании фазовых измерений для задачи ориентации в интегрированной инерциально-спутниковой системе // Гирокопия и навигация, 2010. №1 (68). С. 26–35.
11. Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J.M., and Hernández-Pajares, M., GNSS Data Processing, 2013, vol. I: Fundamentals and Algorithms, 238 p.
12. Карапиш А.А., Ханыкова Е.А., Смирнов Ф.Р. Динамические измерения по сигналам ГНСС для сравнения шкал времени // Материалы IX Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». 2018. С. 120–121.
13. Koubek, J., A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products, 2009. URL: <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/GuidetoUsingIGSProducts.pdf>.
14. IERS Conventions (2010) IERS technical note no. 36. International Earth Rotation and Reference Systems Service, Gerard Petit and Brian Luzum, 2010, p. 179.

15. Grewal, M.S., Weill, L.R., Andrews, A.P., Global Positioning System, Inertial Navigation, and Integration, 2007, 416 p.
 16. **Inertial Explorer 8.5** [электронный ресурс]. Waypoint Software. NovAtel. URL: <https://novatel.com/products/waypoint-software/inertial-explorer> (дата обращения: 22.09.2020).
 17. Center for Orbit Determination in Europe [Электронный ресурс]. URL: [//ftp.aiub.unibe.ch/CODE/2019/](ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/2019/).
-

Karaush, A.A., Karaush, E.A., Burtsev, S.Yu., Smirnov, F.R. (All-Russia Research Institute of Physicotechnical and Radio Measurements (VNIIFTRI), Russia)
GNSS-Based Estimation of Time Scale Displacement for a Transportable Frequency Standard in Motion, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 3 (110), pp. 60–75.

Abstract. The objective of this work is to determine the accuracy characteristics of time scale displacement estimates for a transportable quantum frequency standard in motion. The estimates under study have been obtained on the basis of measurements from global navigation satellite systems and inertial navigation system. The results of both separate and joint processing of measurements from two systems are presented. Quantitative estimation of error reduction in determining the time scales displacement has been done by integrating the measurements.

Key words: inertial navigation system, global navigation satellite systems, time and frequency standard, time scale, Precise Point Positioning.

Материал поступил 29.11.2019