

Гравитационное влияние на частотно-временные характеристики часов навигационных спутников ГЛОНАСС

С. А. Алексейцев^{1}, В. К. Бадер¹, В. Д. Рачков¹, А. С. Толстиков^{1,2}*

¹ Западно-Сибирский филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», г. Новосибирск, Российская Федерация

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: aleksejtsev.94@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрен один из путей совершенствования глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС методом введения в штатную группировку навигационных космических аппаратов (НКА) высокоорбитального сегмента спутников, для которых высота в апогее значительно превышает высоту в перигее, а также спутников с геосинхронными орбитами. Такое совершенствование космического созвездия навигационной системы позволяет достичь увеличения качества навигационной информации потребителей. Рассмотрен вопрос применения межспутниковых измерений (МСИ) с целью повышения информативности траекторных измерений НКА. При этом достигается уменьшение интервала времени между закладками эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) до 2-х часов. Рассмотрено влияние факторов релятивистской и нерелятивистской природы на эфемеридно-временные параметры высокоорбитального космического комплекса (ВКК), где особое внимание уделено влиянию гравитационного потенциала.

Ключевые слова: навигация, высокоэллиптическая орбита, геосинхронная орбита, атомные стандарты времени, спутниковое созвездие

Gravitational influence on the frequency-time characteristics of GLONASS navigation satellites onboard clocks

S. A. Aleksejtsev^{1}, V. K. Bader¹, V. D. Rachkov¹, A. S. Tolstikov^{1,2}*

¹ West Siberian Branch of the Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Physical and Radio Engineering Measurements», Novosibirsk, Russian Federation

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: aleksejtsev.94@mail.ru

Abstract. The paper considers one of the ways to improve the global navigation satellite system (GNSS) GLONASS by introducing into the regular constellation of navigation spacecraft (NSV) a high-orbit segment of satellites, for which the height at apogee significantly exceeds the height at perigee, as well as satellites with geosynchronous orbits. Such improvement of the space constellation of the navigation system allows to achieve an increase in the quality of navigation information for consumers. The issue of using inter-satellite measurements (ISM) with the aim of increasing the information content of trajectory measurements of satellites is considered. This achieves a reduction in the time interval between ephemeris-temporal support (ETS) bookmarks to 2 hours. The influence of factors of relativistic and non-relativistic nature on the ephemeris-time parameters of the high-orbit space complex (HEC) is considered, where special attention is paid to the influence of the gravitational potential.

Keywords: navigation, highly elliptical orbit, geosynchronous orbit, atomic time standards, satellite constellation

Введение

В стратегической повестке АО ГЛОНАСС на период до 2024 года обозначены ключевые направления совершенствования существующих сегодня решений в области обеспечения потребителей качественной высокоточной информацией об их запрашиваемых навигационных параметрах. В круг сфер деятельности компании входят как транспортно-логистический, так и инфраструктурно-телекоммуникационный сегменты. Данные направления также входят и в перечень целевых программ развития Российской Федерации, и, поэтому, обладают особым приоритетом стратегической линии России.

Анализ тактико-технических характеристик зарубежных аналогов ГНСС ГЛОНАСС, таких как «Галилео» – Европейский союз, «Beidou» – КНР, «GPS» – США, а также региональных навигационных систем «DORIS» – Франция, «IRNSS» – Индия, «QZSS» – Япония, показал, что Россия отстает от них по показателям точности шкал бортовых стандартов времени (табл. 1) [1].

Таблица 1

Расхождения шкал времени ГНСС

Характеристика	NavIC	Galileo	Beidou	QZSS	GPS	ГЛОНАСС
Опорная ШВ	UTC(USNO)	UTC(SU)	UTC	UTC(NTSC)	UTC(NICT)	UTC(NPLI)
Расхождение ШВС – UTC(k), не более (по модулю 1с)	40 нс (95%)	50 нс (95%)	100 нс	1 мкс	1 мкс	1 мс

Сложность эксплуатации спутникового сегмента системы связана с тем, что основная часть измерительных станций ГЛОНАСС находится на ограниченной территории Российской Федерации. Вследствие этого покрытие орбит навигационных спутников (НС) измерениями составляет 45%, чего недостаточно для формирования качественного ЭВО системы. Ограниченность расположения средств закладки ЭВО на НС не позволяет обновлять такую закладку чаще, чем 1–2 раза в сутки.

Ресурс повышения качества навигационной информации

Уход бортовых шкал времени вызван физической нестабильностью бортовых стандартов времени и частоты и отсутствием точных моделей учета этих нестабильностей в реальном и прогнозируемом времени. Контрмерой к описанным механизмам возникновения расхождений шкал времени ГНСС с координированным временем является максимально точный учет описанных механизмов.

На сегодняшний день архитектура построения ГНСС некоторых стран позволяет реализовывать эффективные меры по увеличению показателей их точности путем введения большего количества НКА в существующие группировки. В табл. 2 представлены актуальные данные по техническому оснащению ГНСС передовых стран в данной области [1].

Архитектура современных ГНСС

Среднеорбитальный сегмент				
Параметр	ГЛОНАСС	GPS	GALILEO	BEIDOU
Количество КА, шт	24	24+	24 (+3 резерв)	24
Высота орбиты, км	19 100	20 200	23 222	21 528
Большая полуось	25 518	26 560	29 600	-
Период, ч., мин., с.	11, 15, 44	11, 58, 00	14, 4, 45	12, 53, 24
Наклонение, гр.	64,8	55	56	-
Количество плоскостей	3	6	3	3
Высокоорбитальный геосинхронный сегмент				
Количество КА, шт	Ведутся НИР в рамках ФЗЦП	Нет	Ведутся НИР в рамках программы EGEP (2-е поколение)	3+
Высота орбиты, км				35 786
Наклонение, гр.				55
Геостационарный сегмент				
Количество КА, шт	Ведутся НИР в рамках ФЗЦП	Нет	Ведутся НИР в рамках программы EGEP (2-е поколение)	3+
Высота орбиты, км				35 786
Орбитальные точки				58,75° в.д., 80° в.д., 110,5° в.д., 140° в.д., 160° в.д.

Помимо ГНСС быстро развивается комплекс широкозонных дифференциальных систем, таких как European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS, EU), Wide Area Augmentation System (WAAS, USA), The GPS Aided Geo Augment Navigation System (GAGAN, India), Региональная система дифференциальной коррекции (РСДКМ, Россия) [2].

Модернизация существующей 24-спутниковой группировки предполагается добавлением 6 спутников на околокруговых орбитах, что повысит качество навигационной информации потребителей.

Значительный ресурс по точности информационных измерений может быть достигнут расширением межспутниковых измерений. При этом, в качестве обработчика этих измерений может быть использована как станция на Земле, так и НКА с геостационарной орбитой, т. е. с минимизированными либо точно учтенными влияниями эффектов релятивистской и нерелятивистской природы на бортовые стандарты часов. Циклограммы обмена межспутниковой информацией для расширенной группировки из 30 спутников также должны быть усовершенствованы.

Отдельный вопрос возникает с размещением геостационарного сегмента опорных часов, с которыми будут сверяться остальные НКА. Такой системный хранитель времени, расположенный в космическом пространстве, позволит избавиться от влияния тропосферной и ионосферной задержек радиоволн.

Таким образом, ресурс по увеличению точности выдаваемых координат может быть реализован совершенствованием следующих направлений:

- разработкой и введением бортовых аппаратов межспутниковых измерений (БАМИ), осуществляющих алгоритмы синхронизации шкал времени группировки беззапросными методами;

- расширение рабочих полос частот используемых литер;
 - организацией устойчивого информационно-измерительного поля внутри спутниковой группировки, основанного на принципах роевого интеллекта [3, 4];
 - повышением стабильности бортовых стандартов частоты и времени и разработкой более точных аналитических моделей прогнозирования ухода соответствующих шкал;
 - вывод на орбиту высокоорбитальной и геосинхронной группировок НКА.
- Среди факторов, влияющих на эфемероидно-временные параметры НКА высокоорбитального сегмента, можно выделить следующие (табл. 3).

Влияние данных факторов неодинаково. Степень их влияния полностью зависит от траекторных параметров НКА и более всего сказывается для высокоорбитального сегмента (ретрансляционного). Исходя из сказанного, представляет бесспорный практический и научный интерес разработка модели учета данных параметров (табл. 3) с целью повышения точности навигационной информации.

Таблица 3

Степени влияния факторов релятивистской и нерелятивистской природы на бортовые шкалы времени

№	Эффект	ΔT_s
1	Эффект Саньяка	100 нс
2	Гравитационный сдвиг частоты	36 нс
3	Вторая зональная гармоника	9,49 нс
4	Смещение из-за орбиты НС	23 нс
5	Возмущения из-за Солнца и Луны	10 пс
6	Тонкие релятивистские эффекты	0,03 нс

Влияние гравитационного потенциала на бортовые шкалы времени

Уход бортовой шкалы времени, вызванный релятивистским эффектом разности потенциалов для разных высот точек установки часов, может быть оценен соотношением (1) [5]:

$$t_H = t_0 - \tau(t_0) + \frac{\gamma_m H_m^\gamma}{c^2} (t - t_0), \quad (1)$$

где t – текущий момент координатного времени; $\tau(t_0)$ – собственное время часов в момент координатного времени t_0 ; t_0 – начальный момент координатного времени; γ_m – нормальное ускорение силы тяжести; H_m^γ – высота над поверхностью геоида; c – скорость света в вакууме.

На рис. 1 показаны уходы бортовых часов для разных высот круговых орбит НКА.

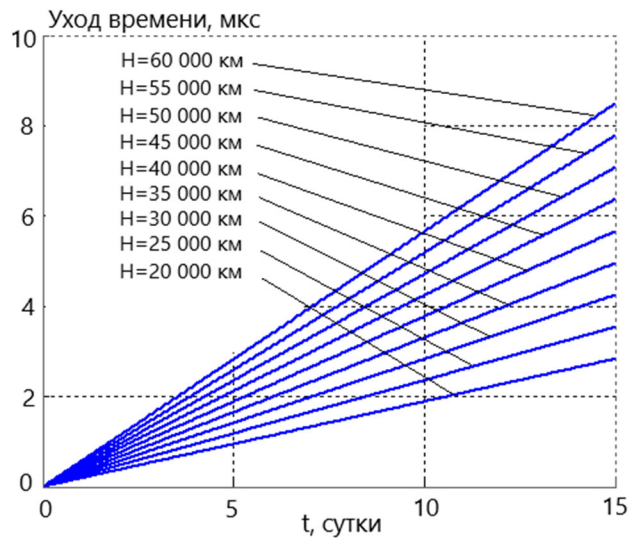


Рис. 1. Вычисленные значения ухода бортовых шкал времени, обусловленные влиянием гравитационного поля Земли

В 2016 году на территории Республики Алтай было получено экспериментальное подтверждение теоретических предпосылок общей теории относительности по воздействию гравитации на ход часов атомных стандартов [6]. Атомные стандарты часов были расположены в двух точках, различающихся высотами над поверхностью Земли. Были зафиксированы данные о скорости хода часов в двух точках – с. Шебалино и Семинского перевала (рис. 2).

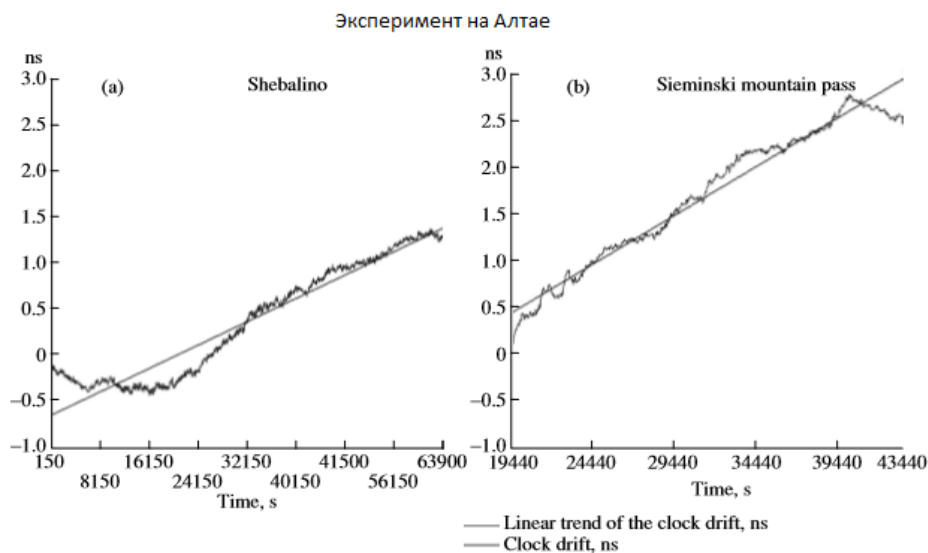


Рис. 2. Экспериментально измеренные тренды хода времени атомных стандартов частоты, находящиеся на разных высотах относительно Земли

Различный угол наклона линейных трендов говорит о разности скорости хода часов, находящихся на различных высотах.

Заключение

На основе проведенного анализа технической комплектации современных ГНСС можно уверенно сказать, что существующий на сегодняшний день ресурс повышения точности навигации в России может быть достигнут совершенствованием двух направлений, а именно: запуском ВКК и введением МСИ для всех единиц группировки; совершенствованием математических моделей учета нестабильности бортовых шкал времени и физических эффектов релятивистской и нерелятивистской природы. Внимания заслуживает также техническая реализация аппаратуры БАМИ, где потребуется пересмотреть технические решения приемо-передающих систем и узлов с целью обеспечения необходимого трафика и точностных характеристик радиотрасс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/glonass.php>, дата обращения 10.06.2022.
2. Демьянов В. В. Тенденции развития технологий GNSS и направлений их применения на транспорте / В. В. Демьянов, О. Б. Имарова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – Т. 58, № 2. – С. 82–90. – DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).82-90.
3. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 940 с.
4. Миллер, П. Роевой интеллект: Муравьи, пчелы и птицы способны многому нас научить // National Geographic Россия. – 2007. – № 8. – С. 88–107.
5. Липатников Л. А. Релятивистский эффект в часах приемников ГНСС. Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2011. – № 3 (16). – С. 45–52.
6. Gienko E.G., Kopeikin S.M., Kanushin V.F., Karpik A.P., Tolstikov A.S., Goldobin D.N., Kosarev N.S., Karaush A.A., Ganagina I.G., Mazurova E.M. The determination of heights differences by gravity frequency shift of mobile standard // Материалы VIII Международного симпозиума. Санкт-Петербург, 14–16 сентября 2016 г.

© С. А. Алексейцев, В. К. Бадер, В. Д. Рачков, А. С. Толстиков, 2022