

Сравнительный анализ результатов моделирования и эксперимента сличения шкал времени двухпутевым методом с использованием средств наземного комплекса управления и спутникового оборудования ГНСС ГЛОНАСС

© С. В. Подрезов¹, Ю. А. Винник¹, Н. Н. Новиков²,
М. Ю. Ортиков¹, С. М. Соколов¹, А. А. Иванов¹

¹ВКА им. А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

²АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Приводится анализ результатов моделирования сличения шкал времени двухпутевым методом с ретрансляцией через динамический ретранслятор на основе КА ГЛОНАСС. Для учета динамики ретранслятора использовались дополнительные измерения доплеровской скорости. Результаты моделирования позволяют обосновать требования к измерительному каналу радиальной скорости для практической реализации высокоточных сличений шкал времени двухпутевым методом с использованием навигационных КА ГЛОНАСС.

Ключевые слова: двухпутевой метод, сравнение шкал времени, глобальная навигационная спутниковая система, навигационный космический аппарат, ретранслятор.

Двухпутевой метод (ДПМ) сличения шкал времени (ШВ) с использованием спутников-ретрансляторов (СР) на геостационарной орбите является в настоящее время одним из наиболее точных методов синхронизации территориально удаленных высокостабильных эталонов времени [1, 2] и активно используется при формировании международного атомного времени (ТАИ) и Всемирного координированного времени (UTC).

Применение ДПМ сличения ШВ через СР на негеостационарных орбитах существенно расширяет возможности реализации синхронизации потребителей, однако высокоточная синхронизация требует обязательного учета динамики СР и изменения состояния канала распространения на интервале сличений.

В [3] рассмотрена реализация ДПМ сличения ШВ эталонов на основе использования запросных радиолиний измерительных систем (ИС) наземного

комплекса управления (НКУ) КА ГЛОНАСС с ретрансляцией сигналов через бортовой ретранслятор навигационного космического аппарата (НКА) ГЛОНАСС. Для учета и компенсации динамики ретранслятора предложено использование дополнительных измерений доплеровской скорости навигационного КА (интегральный доплеровский метод). Известно, что потенциальная точность измерения доплеровской частоты определяется относительной нестабильностью опорного генератора измерителя [2]. При реализации сличения ШВ эталонов на основе ИС НКУ ГЛОНАСС, соответственно, ШВ ИС привязываются к ШВ сличаемых эталонов и используются высокостабильные опорные частоты эталонов. Таким образом, особенностью канала измерения доплеровской радиальной скорости, как канала измерения доплеровской частоты измерительной станцией, является высокая потенциальная точность измерений, определяемая нестабильностью опорных генераторов эталонов — относительная нестабильность сличаемых эталонов менее 10^{-14} .

Невзаимность путей распространения $\Delta L(t_i, t_i + T)$ — разность дальностей распространения сигналов ШВ ИС1 – ИС2 и ИС2 – ИС1 в момент времени t_i и $(t_i + T)$, соответственно, определяется интегрированием измерений радиальных скоростей [3], полученных на основе измерений ИС1 и ИС2

$$\Delta L(t_i, t_i + T) = \int_{t_i}^{t_i + T} v_1(t) dt + \int_{t_i}^{t_i + T} v_2(t) dt,$$

где $v_1(t)$, $v_2(t)$ — радиальные скорости НКА относительно ИС1 и ИС2.

В уравнении сличения, в отличие от дуплексного способа, добавляется дополнительная погрешность $\sigma_{\Delta L}^2$, обусловленная измерениями доплеровской частоты.

Для оценки возможностей реализации точностных характеристик ДПМ сличения ШВ с ретрансляцией через НКА разработана аналитико-имитационная модель сличения ШВ с ретрансляцией через СР. Движение СР описывается системой дифференциальных уравнений в соответствии с теорией полета ИСЗ. Измерения текущих навигационных параметров (ИТНП) (беззапросные и запросные дальности и радиальные скорости) ИС1 и ИС2 выполняются последовательно. Инструментальная погрешность ИТНП СР учитывается на основе модели случайных процессов ошибок измерений дальности и радиальной скорости. Модель беззапросных ИТНП включает учет задержки времени распространения сигналов, обусловленной эффектом Санныяка в соответствии с рекомендациями ITU-R TF.1153-3, релятивистские и гравитационные эффекты не учитываются.

Последовательный алгоритм (два сеанса ИТНП ИС1 и ИС2) предусматривает последовательную передачу сигналов ШВ. На первом сеансе измерений проводятся запросные ИТНП ИС1 и беззапросные ИТНП ИС2, на втором сеансе измерений проводятся запросные ИТНП ИС2 и беззапросные ИТНП ИС1.

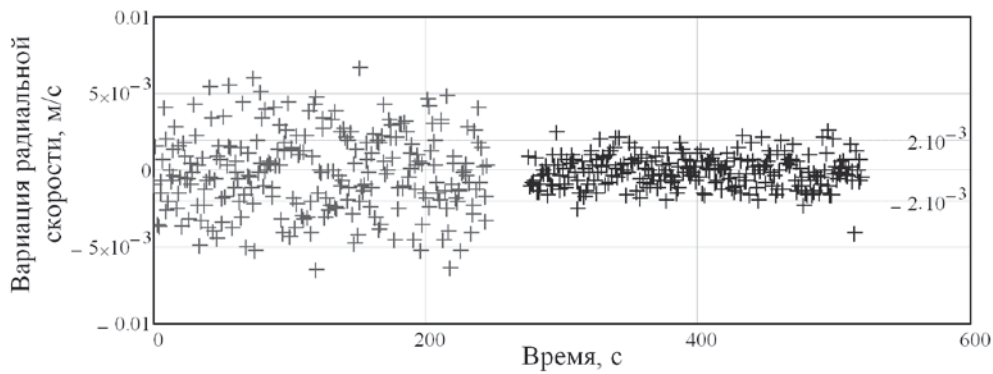


Рис. 1. Погрешность измерения радиальной скорости ИС1

Проведение двух последовательных сеансов ИТНП эквивалентно взаимной передаче сигналов ШВ в соответствии с ДПМ.

На рис. 1 представлены вариации радиальной скорости $\Delta V_{R\text{ ИС1}}(t)$ ИС1 для сеанса сличения, состоящего из двух последовательных сеансов ИТНП с паузой, необходимой для переключения режимов работы ИС. Погрешности измерений радиальной скорости моделировались с учетом вида эксперимента — погрешность беззапросных измерений больше погрешности запросных.

На рис. 2 показана погрешность учета невязности $\Delta L(t_i, t_i + T)$ на интервале измерений 250 с, $\sigma_{\Delta v_1} = 1.1 \times 10^{-3}$ [м/с], $\sigma_{\Delta v_2} = 2.64 \times 10^{-3}$ [м/с].

Видно, что погрешность учета невязности $\Delta L(t)$ путей распространения сигналов ШВ не превышает ± 2 см, а средняя величина невязности равна $\Delta L_{cp} = 7.2 \times 10^{-3}$ [м] и практически не вносит дополнительную погрешность в сличение ШВ.

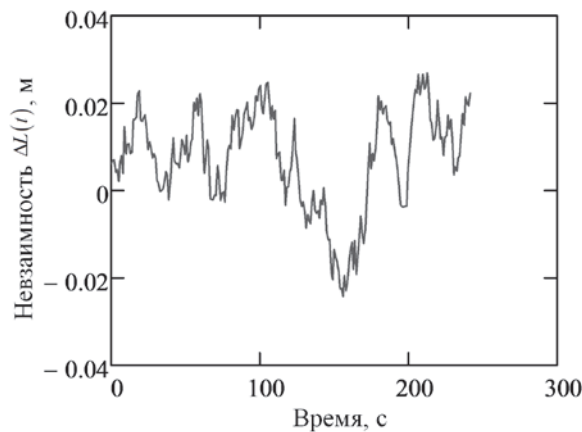


Рис. 2. Погрешность учета путей распространения сигналов ШВ

Таким образом, анализ результатов сличения ШВ позволяет сделать вывод о возможности компенсации динамики и проведения высокоточных сличений через НКА, обосновать требования к ИС, выработать рекомендации по обеспечению условий наиболее эффективного проведения сеансов сличений, а также определить пути дальнейшего совершенствования технологии ДПМ сличения ШВ территориально удаленных эталонов при использовании НКА ГНСС ГЛОНАСС и измерительных средств НКУ.

Литература

1. Оперативное использование двусторонней передачи сигналов времени и частоты через спутники с применением псевдослучайных шумовых кодов [Электронный ресурс] // Рекомендация МСЭ-R TF.1153-3 (03/2010): электронная публикация. — Женева: Международный союз электросвязи, 2010. — URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/rt/R-REC-TF.1153-3-201004-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 19.03.2018).
2. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. — М.: Техносфера: 2002. — 400 с.
3. Алёшкин А. П., Бакурский К. В., Винник Ю. А., Дружин В. Е. и др. Результаты эксперимента по двухпутевому методу сличения шкал времени территориально удаленных высокостабильных эталонов с использованием средств наземного комплекса управления и спутникового оборудования ГНСС ГЛОНАСС // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2013. — Вып. 27. — С. 70–75.

Analysis of Simulation Results and the TWSTFT Time Scale Comparison Experiment Using the Ground Control System and the GLONASS Satellites

S. V. Podrezov, Y. A. Vinnik, N. N. Novikov, M. Y. Ortikov,
S. M. Sokolov, A. A. Ivanov

The article presents the comparative analysis of simulation and experiment results of the time scales compared by the two-way satellite time and frequency transfer method (TWSTFT), with retransmission via a dynamic repeater based on the GLONASS satellite. We have made additional radial velocity measurements to take into account the GLONASS satellite motion. The simulation results allow us to justify the requirements for the radial velocity measurement channels in case of high precision time scale comparison by the two-way method using the GLONASS satellites.

Keywords: TWSTFT, comparison of time scales, global navigation satellite system, navigational spacecraft, relay satellite.