

Оценивание гравитационных изменений частоты в задачах хронометрического нивелирования на основе применения спутниковых навигационных технологий

С. А. Алексейцев¹, Д. Ф. Гусар¹, В. Д. Рачков¹, А. С. Толстиков^{1,2}, Л. В. Шмидт¹*

¹ Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Новосибирск, Российская Федерация

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

* e-mail: tolstikov@sstf.nsk.ru

Аннотация. В работе обсуждается возможность оценивания изменений частоты квантовых стандартов, связанных с перемещением этих стандартов на разные уровни гравитационного поля Земли. Необходимость в таком оценивании возникает в задачах хронометрического нивелирования при создании системы измерений ортометрических высот относительно геоида.

Ключевые слова: хронометрическое нивелирование, стандарты частоты, роверный стандарт частоты, гравитационный потенциал, синхронизация, оценивание частоты, спутниковые навигационные технологии

The estimation of frequency shift when solving the problem of chronometric leveling by using satellite navigation technologies

S. A. Alekseytsev¹, D. F. Gusar¹, V. D. Rachkov¹, A. S. Tolstikov^{1,2}, L. V. Shmidt¹*

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: tolstikov@sstf.nsk.ru

Abstract. The paper deals with the problem of frequency shift effect of quantum standards caused by moving them in the gravitational field of Earth. The study of this effect is highly topical for solving the problem of chronometric leveling when designing the systems of orthometric altitudes estimation on the geoid.

Keywords: chronometric leveling, frequency standards, rover frequency standard, gravitational potential, synchronization, frequency estimation, satellite navigation technologies

Введение

Существенный прогресс в обеспечении точности частотно-временных измерений связан с воспроизведением единиц времени и частоты на основе квантовых переходов в атомах веществ щелочной группы [1]. Это позволило создавать высокостабильные стандарты частоты и времени эталонного уровня.

Исследования метрологических характеристик указанных стандартов выявили зависимость частоты квантового перехода от уровня гравитационного потенциала, на котором находится стандарт. Этот эффект описан в теории относительности Эйнштейна [2, 3] как гравитационное смещение частоты.

В рамках возникшего на основе эффекта гравитационного смещения частоты направления «релятивистской геодезии» получила развитие технология хронометрического нивелирования [2]. Применение этой технологии позволяет:

- решить задачу формирования высотной основы России на базе сети квантовых фудштоков [4];
- обеспечить создание цифровой основы представления рельефа России;
- обеспечить повышение точности координатно-временных определений (КВНО) на основе применения спутниковых навигационных технологий;
- расширить возможности использования базовых ГНСС станций.

Оценивание гравитационного смещения частоты

Ключевым моментом в технологии хронометрического нивелирования является оценивание гравитационного смещения частоты роверного стандарта частоты $\Delta f = f - f_0$, перемещаемого на разные уровни гравитационного потенциала $\Delta W = W - W_0$ и эталонного стандарта, воспроизводящего эталонную шкалу времени и воспроизводящего эталонную частоту f_0 в системе ГСВЧ [5].

Релятивистское смещение частоты, связанное с изменением уровня гравитационного потенциала соотношением [2, 3]

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{\Delta W}{c^2}, \quad (1)$$

где c – скорость света, как правило, имеет малые значения. Это обстоятельство накладывает определенные требования на условия проведения измерительных экспериментов, на выбор метода оценивания релятивистского смещения частоты, требования к каналам передачи измерительной информации.

Специфичные условия проведения измерительных экспериментов.

1. Необходимость высокоточных измерений малых уровней изменения частоты заставляет использовать в качестве роверных высокостабильные стандарты частоты с термостабилизацией.

2. Необходимо обеспечить роверный стандарт частоты автономным электропитанием.

3. Необходимо работать на значительных интервалах времени, чтобы иметь возможность накопления данных и усреднения полученных результатов.

4. Может возникнуть необходимость в предварительной обработке измерительной информации с целью введения компенсирующих поправок и сглаживания результатов измерений.

В работах [2, 4] указаны и проранжированы по уровням и по характеру изменения во времени дополнительные релятивистские влияния на моменты шкал времени квантовых часов. Это лунно-солнечные приливные явления, определяе-

мые упругими свойствами Земного шара. Суммарный эффект этих влияний не превышает 40 пс.

При выборе каналов передачи измерительной информации от роверного стандарта до эталонного возможны варианты.

При нахождении роверного стандарта в непосредственной близости от эталонного стандарта, в условиях, когда возможна передача частотных сигналов по кабельным или оптоволоконным каналам, наилучшим способом измерения разности частот стандартов следует считать метод фазового компарирования [6]. Оценка частоты в этом случае понимается как отношение накопленной разности фаз измеряемых гармонических сигналов к длительности интервала накопления данных. Собственные нестабильности фазового компаратора, оцененные в режиме калибровки прибора, составляют $(2-3) \cdot 10^{-18}$ на суточном интервале времени.

В случае значительного удаления роверного стандарта частоты от эталонного стандарта необходимо привлечение спутниковых технологий.

При использовании для оценивания релятивистского смещения частоты ГНСС технологий измерительные платформы эталонного и роверного стандартов дополнительно оборудуются однотипными приемниками навигационных сигналов и измерителями интервалов времени для измерений разностей моментов шкал времени стандартов и сигналов 1PPS приемников. В качестве исходных данных для оценивания релятивистского смещения частоты роверного стандарта используются результаты кодовых

$$D_A(t) = \rho_A(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA}) + c \cdot (\Delta T_S(t) + \Delta T_{RA}) \cdot c + (\tau_{\text{ион}} + \tau_{\text{тр}}) \cdot c + \sum_{k=1}^n p_{kA}(t) \quad (2)$$

$$D_B(t) = \rho_B(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RB}) + c \cdot (\Delta T_S(t) + \Delta T_{RB}) \cdot c + (\tau_{\text{ион}} + \tau_{\text{тр}}) \cdot c + \sum_{k=1}^n p_{kB}(t)$$

и фазовых

$$F_A(t) = \rho_A(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA}) + c \cdot (\Delta T_S(t) + \Delta T_{RA}) \cdot c + (\tau_{\text{ион}} + \tau_{\text{тр}}) \cdot c + N_A \cdot \lambda + \sum_{k=1}^n q_{kA}(t) \quad (3)$$

$$F_B(t) = \rho_B(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RB}) + c \cdot (\Delta T_S(t) + \Delta T_{RB}) \cdot c + (\tau_{\text{ион}} + \tau_{\text{тр}}) \cdot c + N_B \cdot \lambda + \sum_{k=1}^n q_{kB}(t)$$

псевдодальномерных измерений [7, 8], выполненных в месте дислокации эталона (A) и в месте расположения роверного стандарта (B). Здесь приняты обозначения:

c – скорость распространения радиоволн;

$\mathbf{u}_S^T = (x_S, y_S, z_S)$ – вектор координат навигационного спутника в гринвичской системе координат;

$\mathbf{u}_{RA}^T = (x_{RA}, y_{RA}, z_{RA})$ – вектор координат стандарта A в гринвичской системе координат; $\mathbf{u}_{RB}^T = (x_{RB}, y_{RB}, z_{RB})$ – вектор координат роверного стандарта B в гринвичской системе координат;

$\rho_A(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA}) = \sqrt{(x_S - x_{RA})^2 + (y_S - y_{RA})^2 + (z_S - z_{RA})^2}$ – геометрическая дальность от спутника до эталонного стандарта в точке с координатами \mathbf{u}_{RA} ; $\rho_B(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RB}) = \sqrt{(x_S - x_{RB})^2 + (y_S - y_{RB})^2 + (z_S - z_{RB})^2}$ – геометрическая дальность от спутника до роверного стандарта в точке с координатами \mathbf{u}_{RB} ;

$\Delta T_S(t), \Delta T_{RA}$ – уходы моментов шкал времени навигационного спутника и эталонного стандарта от шкалы государственного эталона на момент измерений;

$\tau_{\text{ион}}, \tau_{\text{тр}}$ – задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях околоземного пространства;

$N_A \cdot \lambda$ – неопределенное количество фазовых циклов несущей навигационного сигнала с периодом λ на трассе $\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA}$ на начало измерений;

$\sum_{k=1}^n p_{kA}(t), \sum_{k=1}^n q_{kA}(t)$ – дополнительные факторы случайной природы, влияющие на точность кодовых и фазовых псевдодальномерных измерений.

Для проведения сеансов измерений выбираются навигационные спутники, одинаково радиовидимые в пунктах A и B .

Для расчета оценки релятивистского смещения частоты роверного стандарта в пункте B по результатам кодовых (2) или фазовых (3) измерений, выполненных на интервале времени $I = t_k - t_0$, используется выражение

$$\frac{\Delta f_B}{f_0} = \frac{\nabla T_{AB}(t_k) - \nabla T_{AB}(t_0)}{t_k - t_0} \quad \text{а), где} \quad \nabla T_{AB}(t) = \Delta T_{RA}(t) - \Delta T_{RB}(t) \quad \text{в)} \quad (4)$$

Значения уходов часов приемников в пунктах A и B ($\Delta T_{RA}(t)$ и $\Delta T_{RB}(t)$ – соответственно) вычисляются непосредственно из уравнений кодовых (2) или фазовых (3) измерений. При этом предварительно требуется рассчитать и ввести в расчетные выражения (2) и (3) компенсирующие поправки на геометрические дальности $\rho_A(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA}), \rho_B(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RB})$, а также на задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях $\tau_{\text{ион}}, \tau_{\text{тр}}$. Уходы бортовых часов $\Delta T_S(t)$ в уравнениях псевдодальномерных измерений (2) и (3) являются общими для каждого радиоканала и в разностях (4в) взаимнокомпенсируются. Аналогичным образом исключается влияние неоднозначностей фазовых изменений $N_A \cdot \lambda$ и $N_B \cdot \lambda$ в разностях (4а) на результаты оценивания $\frac{\Delta f_B}{f_0}$.

Точность оценивания релятивистского смещения частоты роверного стандарта в рассматриваемом эксперименте главным образом зависит:

– от уровней погрешностей расчета геометрических дальностей $\rho_A(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA}), \rho_B(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RB})$;

– погрешностей компенсации ионосферной и тропосферной задержек $\tau_{\text{ион}}, \tau_{\text{тр}}$;

– уровней шумовых составляющих $\sum_{k=1}^n p_{kA}(t), \sum_{k=1}^n q_{kA}(t), \sum_{k=1}^n p_{kB}(t),$

$\sum_{k=1}^n q_{kB}(t)$ в уравнениях измерений (2), (3).

Для повышения точности расчетов $\frac{\Delta f_B}{f_0}$ следует:

– привлекать высокоточные апостериорные эфемериды спутников, в соответствии с методологией PPP позиционирования [9–11], и использовать точные координаты стандартов в пунктах *A* и *B*;

– использовать ионосферно-свободные комбинации уравнений измерений типа комбинаций Мельбурна-Вуббена [10];

– при выборе измерительных каналов отдавать предпочтение каналам фазовых измерений, имеющим уровень шумовых составляющих погрешностей измерений на порядок меньший, чем в кодовых измерениях на тех же радиотрассах [7, 9].

Для сравнения шкал времени эталонного и роверного стандартов может быть применен дуплексный канал космической связи (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer – TWSTFT) [12]. Этот метод синхронизации самый точный. Погрешность сравнения шкал времени методом TWSTFT не превышает 0,3 пс.

Однако стоимость применения этого метода – самая высокая. Требуется использования в месте дислокации роверного стандарта специальной дорогостоящей аппаратуры, и необходима аренда каналов связи до геостационарных спутников. Эти обстоятельства не позволят применить метод TWSTFT для решения задач хронометрического нивелирования.

Благодарности

Авторы выражают благодарность держателям гранта «ГЕОТЕХ-КВАНТ», при поддержке которых стали возможны проведенные исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS, М.: Техносфера, 2002.
2. Фатеев В.Ф. Релятивистская метрология околоземного пространства-времени. – Монография. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017, ил. 22, табл. 1, библи. 269, 439 с.
3. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Reviews in Relativity, 2003. V. 6. – P. 1–42.

4. Фатеев В.Ф. Релятивистская метрология околоземного пространства-времени и ее практические приложения. – *Астрономический журнал*. – 2018. – №12. – С. 937–942.
5. Фатеев В.Ф., Сысоев В.Г. Релятивистские эффекты в мобильных часах / *Измерительная техника*. – 2014. – №8. – С. 31–35.
6. Компаратор фазовый многоканальный ЯКУР.411146.030. Руководство оператора. Версия 1.0.г. Нижний Новгород. 2015 г. 31 с.
7. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т 1. М.: «Картогеоцентр», 2005. – 334 с.
8. NAPEOS. *Mathematical Models and Algorithms*. Springer. 2009. P. 150.
9. Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы. Время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. «Радиотехника», Москва, 2008. – 328 с.
10. Kouba J. *A Guide to Using International GNSS Service(IGS) Products*. – 2009. – [http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/Using IGS Products Ver 21](http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/Using%20IGS%20Products%20Ver%2021).
11. Jianghui Geng, Teferle F. N., Shi C., Meng X., Dodson A. H., Liu J. *Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning with Hourly Data // GPS Solutions*. – 2009. – Vol.13. – № 4. – P. 263–270. – <http://www.springerlink.com/content/v7405g7181112117/>.
12. Каган С.Н. О возможности синхронизации опорных узлов формирования шкалы времени ССОП с использованием эталонной базы ГСВЧ. *Альманах современной метрологии*. – 2014. – №1. – С.86–101.

© С. А. Алексейцев, Д. Ф. Гусар, В. Д. Рачков,
А. С. Толстиков, Л. В. Шмидт, 2022