Статья 5

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

59-77

1,2Дмитриев Александр Капитонович, 1Карпик Александр Петрович, 1,2,3Толстиков Александр Сергеевич, 1,2Головин Николай Николаевич, 1,2Савинов Константин Николаевич, 1Болдырев Вячеслав Сергеевич, 3Гусар Дмитрий Федорович, 1,3Алексейцев Сергей Александрович, 3Томилов Андрей Сергеевич, 4Иваненко Алексей Владимирович

1 Сибирский государственный университет геосистем и технологий

Россия, г. Новосибирск

2 Новосибирский государственный технический университет

Россия, г. Новосибирск

3 Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ»

Россия, г. Новосибирск

4 Новосибирский государственный университет

Россия, г. Новосибирск

**Дмитриев**

dmitriev@corp.nstu.ru

ORCID: 0000-0002-8704-2531

**Карпик**

rector@ssga.ru

ORCID: 0000-0001-6657-2069

Web of Science: AAP-6138-2020

Scopus: 6602648591

РИНЦ: 603139

**Толстиков**

tolstikov@sniim.ru

ORCID: 0009-0009-8159-0068

**Головин**

n.golovin@corp.nstu.ru

ORCID: 0000-0002-2997-6651

Publons: T-9782-2018

Web of Science: T-9782-2018

Scopus: 10045215500

РИНЦ: 124363

**Савинов**

k.n.savinov@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-3144-5219

Web of Science: H-1527-2019

Scopus: 23668888200

РИНЦ: 1041905

**Болдырев**

simplemail2019@mail.ru

ORCID: 0009-0008-8858-8836

**Гусар**

gm\_d@mail.ru

ORCID: 0009-0007-8553-4341

**Алексейцев**

alekseytsev.94@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5000-7786

**Томилов**

tomber1@yandex.ru

ORCID: 0009-0004-2525-635X

РИНЦ: 62699581;

**Иваненко**

ivanenko.aleksey@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6331-6067

Web of Science: S-1687-2016

Scopus: 26632025400

РИНЦ: 925697

**Измерение гравитационного смещения частоты в водородных часах при передаче сигнала через оптический и радиочастотный каналы связи**

Реализована схема измерения гравитационного смещения частоты водородных часов при их перемещении между двумя точками, расположенными на разных ортометрических высотах с одновременной передачей сигнала через радио- и оптоволоконную линии связи.

Практический интерес к исследованиям гравитационного смещения частоты квантовых стандартов связан с необходимостью его учета для повышения точности в навигационных спутниковых системах. Такие измерения выполнялись с помощью космического канала синхронизации по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем. Особенно это стало актуальным при повышении метрологических характеристик квантовых стандартов частоты и времени, в частности, с использованием транспортируемых часов на основе оптических решеток при передаче сигнала через волоконно-оптические линии связи. С другой стороны, с использованием квантовых часов выполняются измерения разности ортометрических высот с использованием метода релятивистской синхронизации и одновременного использования эффекта красного смещения стандарта частоты вследствие замедления времени в гравитационном поле и эффекта красного смещения фотонов, преодолевающих гравитационное поле.

В настоящей работе представлены результаты измерения гравитационного смещения частоты водородных часов при их перемещении между двумя точками, расположенными на разных ортометрических высотах с передачей сигнала через оптоволоконную линию связи и по радиоканалу. В первом случае по оптоволоконной линии связи передавалось излучение диодного лазера на длине волны 1,5 мкм, амплитудно-модулированное сигналом от транспортируемых водородных часов на частоте 10 МГц, когда в качестве репера использовались стационарные водородные часы. Передача по радиоканалу осуществлялась по коаксиальному радиочастотному кабелю. Измерения проводились на территории Западно-Cибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ».

УДК

621.317.361

DOI:

10.17212/2782-2001-2024-4-59-77

Ключевые слова:волоконно-оптические линии связи, атомные часы, водородный стандарт частоты, ортометрическая высота, гравитационное смещение частоты, относительная разность частот, передача частоты, фазовое компарирование

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pound R.V., Rebka Jr. G.A. Gravitational red-shift in nuclear resonance // Physical Review Letters. – 1959. – Vol. 3 (9). – P. 439–441.

2. Pound R.V., Rebka Jr. G.A. Apparent weight of photons // Physical Review Letters. – 1960. – Vol. 4 (7). – P. 337–341.

3. Pound R.V., Snider J.L. Effect of gravity on nuclear resonance // Physical Review Letters. – 1964. – Vol. 13 (18). – P. 539–540.

4. Ashby N. Relativity in the global positioning system // Living Reviews in Relativity. – 2003. – Vol. 6. – Art. 1. – P. 1–42. – DOI: 10.12942/lrr-2003-1.

5. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks / M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Yahagi, K. Kokado, H. Shinkai, H. Katori // Nature Photonics. – 2020. – Vol. 14 (7). – P. 411–415. – DOI: 10.1038/s41566-020-0619-8.

6. Real-time geopotentiometry with synchronously linked optical lattice clocks / T. Takano, M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Akatsuka, A. Yamaguchi, Y. Kuroishi, H. Munekane, B. Miyahara, H. Katori. – ArXiv preprint. – URL: https://arxiv.org/pdf/1608.07650 (accessed: 28.11.2024).

7. Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network / J. Ye, J.-L. Peng, R.J. Jones, K.W. Holman, J.L. Hall, D.J. Jones, S.A. Diddams, J. Kitching, S. Bize, J.C. Bergquist // Journal of the Optical Society of America B. – 2003. – Vol. 20 (7). – P. 1459–1467.

8. Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks / T. Takano, M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Akatsuka, A. Yamaguchi, Y. Kuroishi, H. Munekane, B. Miyahara, H. Katori // Nature Photonics. – 2016. – Vol. 10. – P. 662–666. – DOI: 10.1038/nphoton.2016.159.

9. Geopotential difference measurement using two transportable optical clocks’ frequency comparisons / D. Liu, L. Wu, Ch. Xiong, L. Bao // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16. – P. 2462–2477.

10. Geodesy and metrology with a transportable optical clock / J. Grotti, S. Koller, S. Vogt, et al. // Nature Physics. – 2018. – Vol. 14. – P. 437–441. – DOI: 10.1038/s41567-017-0042-3.

11. A clock network for geodesy and fundamental science / C. Lisdat, G. Grosche, N. Quintin, et al. // Nature Communications. – 2015. – Vol. 7. – P. 1038–1051. – DOI: 10.1038/ncomms12443.

12. High-accuracy coherent optical frequency transfer over a doubled 642-km fiber link / D. Calonico, E.K. Bertacco, C.E. Calosso, C. Clivati, G.A. Costanzo, M. Frittelli, A. Godone, A. Mura, N. Poli, D.V. Sutyrin, G. Tino, M.E. Zucco, F. Levi // Applied Physics B. – 2014. – Vol. 117. – P. 979–986.

13. Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А. Экспериментальная проверка квантового нивелира на мобильных квантовых часах // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2021. – Т. 496. – С. 41–44. – DOI: 10.31857/S2686740020060097.

14. Фатеев В.Ф. Релятивистская теория и применение квантового нивелира и сети «Квантовый футшток» // Альманах современной метрологии. – 2020. – № 3. – С. 11–52.

15. Воскобойников Ю.Е. Частотная модель сглаживающего кубического сплайна и ее характеристики // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 5-1. – С. 18–23.

Дата поступления:

29.08.2024

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

1,2Dmitriev Alexandr K., 1Karpik Alexander P., 1,2,3Tolstikov Alexsander S., 1,2Golovin Nickolai N., 1,2Savinov Konstantin N., 1Boldyrev Vyacheslav S., 3Gusar Dmitry F., 1,3Alekseytsev Sergey A., 3Tomilov Andrei S., 4Ivanenko Aleksey V.

1 Siberian State University of Geosystems and Technologies

Novosibirsk, Russian Federation

2 Novosibirsk State Technical University

Novosibirsk, Russian Federation

3 West Siberian Branch of the Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio

Engineering

Novosibirsk, Russian Federation

4 Novosibirsk State University

Novosibirsk, Russian Federation

**Dmitriev**

dmitriev@corp.nstu.ru

ORCID: 0000-0002-8704-2531

**Karpik**

rector@ssga.ru

ORCID: 0000-0001-6657-2069

**Tolstikov**

tolstikov@sniim.ru

ORCID: 0009-0009-8159-0068

**Golovin**

n.golovin@corp.nstu.ru

ORCID: 0000-0002-2997-6651

**Savinov**

k.n.savinov@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-3144-5219

**Boldyrev**

simplemail2019@mail.ru

ORCID: 0009-0008-8858-8836

**Gusar**

gm\_d@mail.ru

ORCID: 0009-0007-8553-4341

**Alekseytsev**

alekseytsev.94@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5000-7786

T**omilov**

tomber1@yandex.ru

ORCID: 0009-0004-2525-635X

**Ivanenko**

ivanenko.aleksey@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6331-6067

**Measuring the gravitational frequency shift in a hydrogen clock when transmitting a signal via optical and radio frequency communication channels**

A scheme for measuring the gravitational frequency shift of hydrogen clocks during their movement between two points located at different orthometric altidudes with simultaneous signal transmission via radio and fiber-optic communication lines has been implemented.

Practical interest in studying the gravitational frequency shift of quantum standards is associated with the need to take it into account to improve accuracy in navigation satellite systems. Such measurements were performed using a space synchronization channel using signals from global navigation satellite systems. This became especially relevant when improving the metrological characteristics of quantum frequency and time standards, in particular, using transportable clocks based on optical lattices when transmitting a signal via fiber-optic communication lines. On the other hand, using quantum clocks, measurements of the difference in orthometric heights are performed using the relativistic synchronization method and the simultaneous use of the frequency standard redshift effect due to time dilation in a gravitational field and the redshift effect of photons overcoming the gravitational field.

This paper presents the results of measuring the gravitational frequency shift of a hydrogen clock when it is moved between two points located at different orthometric heights with signal transmission via a fiber-optic communication line and via a radio channel. In the first case, the radiation of a diode laser at a wavelength of 1.5 μm amplitude-modulated by a signal from the transported hydrogen clock at a frequency of 10 MHz, was transmitted via a fiber-optic communication line when a stationary hydrogen clock was used as a reference. Transmission via a radio channel was carried out via a coaxial radio frequency cable. The measurements were carried out on the territory of the West Siberian branch of the FSUE "VNIIFTRI".

Keywords*:* fiber optic communication lines, atomic clock, hydrogen frequency standard, orthometric altitude/height, gravitational frequency shift, relative frequency difference, frequency transfer, phase comparison