

УДК 524.827

Фундаментальные пределы точности координатно-временной системы отсчета на основе реликтового излучения

Базлев Дмитрий Анатольевич¹

bazlev@bmstu.ru

Гладышев Владимир Олегович¹

gladyshev@bmstu.ru

SPIN-код: 4419-5995

Кауц Владимир Леонидович¹

kauts@bmstu.ru

SPIN-код: 4984-8460

Каютенко Александр Викторович¹

akayutenko@bmstu.ru

Литвинов Дмитрий Александрович^{1,2}

litvda@bmstu.ru

SPIN-код: 7017-1441

Николаев Павел Петрович¹

ppn@bmstu.ru

SPIN-код: 6381-2864

Шарандин Евгений Анатольевич¹

shar@bmstu.ru

SPIN-код: 8626-3470

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия²Астрокосмический Центр ФИАН, Москва, Россия

Аннотация. Одним из перспективных направлений в области ориентации и навигации летательных аппаратов является построение координатно-временной системы отсчета на базе реликтового излучения. Для определения параметров движения в пространстве можно использовать естественную анизотропию температуры фонового электромагнитного излучения Вселенной (реликтового теплового излучения, спектр которого является чернотельным с температурой $T = 2,7$ К). Локальная дипольная анизотропия реликтового излучения связана с эффектом Доплера, возникающим при движении Солнечной системы относительно реликтового фона со скоростью примерно 370 км/с в сторону созвездия Льва. Дипольная анизотропия приводит к изменению температуры неба на уровне $\Delta T \sim 10^{-3}$ К. Также для повышения точности построения координатно-временной системы отсчета может дополнительно использоваться мультипольная анизотропия реликтового излучения и карта точечных источников в миллиметровом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: реликтовое излучение, система отсчета, космология, навигация

Введение. Начало теоретических исследований реликтового электромагнитного излучения связано с работой [1], в которой была вычислена температура излучения [2]. В последующие годы были экспериментально открыты как реликтовое излучение Вселенной, так и его анизотропия [3–5], что было подтверждено в ходе эксперимента COBE [6].

Дипольная анизотропия реликтового излучения, наблюдаемая в околоземном пространстве проявляется в том, что температура излучения в направлении созвездия Льва на 0,01 % выше средней температуры. В про-

тивоположном направлении созвездия Водолея — температура на столько же ниже. Основной гипотезой, объясняющей дипольную компоненту распределения температуры во Вселенной, является эффект Доплера, возникающий при движении Солнечной системы относительно реликтового фона. Также в ходе экспериментов были измерены мультиполи анизотропии реликтового излучения более высоких порядков [6].

Методы и материалы; результаты. Для построения новых систем навигации и ориентации летательных аппаратов с улучшенными характеристиками может быть использована координатно-временная система отсчета на базе реликтового излучения. В основе метода лежит анизотропия реликтового излучения. Способ позволяет однозначно определить угловое положение, скорость, ускорение аппарата в пространстве на основе измерений спектральной плотности мощности по нескольким направлениям.

Реликтовое излучение представляет собой навигационное поле естественного происхождения, которое позволяет непосредственно определять ориентацию и скорость летательного аппарата. Положение в пространстве может быть определено путем интегрирования соответствующих уравнений движения. Для определения времени необходимо использование дополнительных средств, таких как бортовые часы.

На сегодня основными источниками ошибок определения координат, скоростей и ориентации аппарата на основе измерения температуры реликтового излучения являются флуктуационная чувствительность приемников, угловое разрешение оптической системы, а также число измерительных каналов. При использовании 3 измерительных каналов и приемников с чувствительностью на уровне 1 мК (приблизительно соответствует чувствительности космического аппарата Planck) точность определения угловых координат будет составлять менее 1 угл. мин, точность определения скорости движения не менее 100 м/с [7].

Фундаментальные ограничения на точность метода накладывают собственные флуктуации температуры реликтового излучения, возможные отклонения его спектра от Планковского, а также спектр его пространственных неоднородностей. При условии достижения измерительными средствами данных фундаментальных пределов точность определения навигационных параметров на основе измерения карт распределения температуры реликтового излучения может оказаться на несколько порядков выше, чем при использовании глобальных навигационных спутниковых систем.

Заключение. В результате выполненных аналитических и численных оценок продемонстрирована возможность использования анизотропии реликтового излучения для построения координатно-временной системы отсчета с уникальными характеристиками для решения задач навигации и ориентации летательных аппаратов.

Список источников

- [1] Gamow G. Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Mat.-Fis. Medd., 1953, vol. 27 (10), art. no. 1.
- [2] Чернин А.Д. Как Гамов вычислил температуру реликтового излучения, или немного об искусстве теоретической физики. *Успехи физических наук*, 1994, т. 164, № 8, с. 889–896.
- [3] Струков И.А., Брюханов А.А., Скулачев Д.П., Сажин М.В. Анизотропия фонового радиоизлучения. *Письма в Астрономический журнал*, 1992, т. 18, № 5, с. 387–395.
- [4] Strukov I.A., Brukhanov A.A., Skulachev D.P., Sazhin M.V. Anisotropy of the microwave background radiation. *Soviet Astronomy Letters*, 1992, vol. 18, pp. 153–156.
- [5] Strukov I.A. et al. The Relikt-1 experiment – New results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1992, vol. 258, pp. 37–40.
- [6] Bennett C.L. et al. Four-year COBE DMR cosmic microwave background observations: maps and basic results. *Astrophysical Journal Letters*, 1996, vol. 464, pp. 1–4.
- [7] Гордин М.В., Базлев Д.А., Гладышев В.О., Кауц В.Л., Каютенко А.В., Николаев П.П., Фомин И.В., Шарандин Е.А. Использование реликтового излучения для построения новой системы навигации. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*, 2023, т. 3–4 (44–45), с. 108–116.

Fundamental limits of accuracy of the coordinate-time reference system based on cosmic microwave background radiation

*Bazlev Dmitriy Anatolevich*¹

bazlev@bmstu.ru

*Gladyshev Vladimir Olegovich*¹

gladyshev@bmstu.ru
SPIN-code: 4419-5995

*Kauts Vladimir Leonidovich*¹

kauts@bmstu.ru
SPIN-code: 4984-8460

*Kautenko Alekandr Victorovich*¹

akayutenko@bmstu.ru

Litvinov Dmitriy Aleksandrovich^{1,2}

litvda@bmstu.ru
SPIN-code: 7017-1441

*Nikolaev Pavel Petrovich*¹

ppn@bmstu.ru
SPIN-code: 6381-2864

*Sharandin Evgeniy Anatolevich*¹

shar@bmstu.ru
SPIN-code: 8626-3470

¹BMSTU, Moscow, Russia

²Astro Space Center LPI, Moscow, Russia

Abstract. One of the promising directions in the field of aircraft orientation and navigation is the construction of a coordinate-time reference system based on cosmic microwave background radiation. To determine the motion parameters in space, it is possible to use the natural anisotropy of the temperature of the background electromagnetic radiation of the Universe (cosmic microwave background radiation, the spectrum of which is blackbody with a temperature of $T = 2.7$ K). The local dipole anisotropy of the cosmic microwave background radiation is associated with the Doppler effect, which occurs when the Solar system moves relative to the cosmic background at a speed of about 370 km/s towards the

constellation Leo. Dipole anisotropy leads to a change in the temperature of the sky at the level of $\Delta T \sim 10^{-3}$ K. In addition, multipole anisotropy of cosmic microwave background radiation and a map of point sources in the millimeter wavelength range can be used to improve the accuracy of constructing a coordinate-time reference system.

Keywords: cosmic microwave background radiation, reference frame, cosmology, navigation

Introduction. The paper [1], in which the temperature of the cosmic microwave background radiation (CMBR) was computed [2], presented the first theoretical investigation of this phenomenon. Later, both the CMBR and its anisotropy were detected experimentally [3–5] and confirmed by the COBE measurements [6].

The dipole anisotropy of the CMBR observed in the near-Earth space manifests as the radiation temperature in the direction of the Leo constellation being 0.01% higher than its average temperature, with the temperature in the opposite direction, towards the Aquarius constellation, being lower than the average by the same amount. The main hypothesis to explain the dipole component of the temperature distribution in the Universe would be the Doppler effect arising from the motion of the Solar System relative to the CMBR. Moreover, there were experiments that allowed higher multipole orders of the CMBR anisotropy to be measured [6].

Methods and materials; results. A CMBR-based coordinate-time frame of reference may be used to design novel navigation and attitude control systems for advanced spacecraft. The method rests on the anisotropy of the CMBR. It allows the angular position, velocity and acceleration of the spacecraft to be uniquely determined via measuring the power spectral density in several directions.

The CMBR is a navigation field of natural origin that enables the attitude and velocity of the spacecraft to be determined directly. The attitude may be determined by integrating the corresponding equations of motion. Determining the time requires using certain supplementary means, such as an on-board clock.

At present, the error in determining coordinates, velocity and attitude of spacecraft via measuring the CMBR temperature primarily stems from the fluctuation sensitivity of the receivers, the angular resolution of the optical system, and the number of measurement channels. Using 3 measurement channels and receivers with a sensitivity of 1 μ K (which is approximately the same as the sensitivity of the Planck spacecraft), the accuracy of angular coordinate determination will be under 1 arcminute, while the accuracy of motion velocity determination will be at least 100 m/s [7].

There are several sources that impose fundamental limitations on the accuracy of the method: intrinsic fluctuations in the CMBR temperature, its spectrum potentially deviating from the Planck spectrum in specific ways, and the spatial inhomogeneity spectrum of the CMBR. Should measuring instruments reach these fundamental limits, the accuracy of determining navigation parameters by measuring CMBR temperature distribution maps may be several orders of magnitude higher than when using global navigation satellite systems.

Conclusion. Our analytical and numerical assessments demonstrate the potential for using the CMBR anisotropy to design a coordinate-time frame of reference featuring unique characteristics for solving the problems of navigation and attitude control of spacecraft.

References

- [1] Gamow G. Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, Mat.-Fis. Medd. 1953, vol. 27 (10), p. 1.
- [2] Chernin A.D. How Gamow calculated the temperature of the background radiation, or A few words about the fine art of theoretical physics. Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences), 1994, vol. 164, no.8, pp. 89-896.
- [3] Strukov I.A., Bryukhanov A.A., Skulachev D.P., Sazhin M.V. Anisotropy of the background radiation. Astronomy Letters — A Journal of Astronomy and Space Astrophysics, 1992, vol. 18, no. 5, pp. 387-395.
- [4] Strukov I.A., Brukhanov, A.A., Skulachev, D P., Sazhin, M.V. Anisotropy of the microwave background radiation. Soviet Astronomy Letters, 1992, v.18. pp. 153-156.
- [5] Strukov I.A. et al. The Relikt-1 experiment - New results. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1992, v. 258, pp. 37-40.
- [6] Bennett C.L. et al. Four-year COBE DMR cosmic microwave background observations: maps and basic results. Astrophysical Journal Letters, 1996, v. 464, pp. 1-4.
- [7] Gordin M.V., Bazlev D.A., Gladyshev V.O., Kauts V.L., Kayutenko A.V., Nikolaev P.P. Fomin I.V., Sharandin E.A. Using relic radiation to build a novel navigation system. Space, Time, and Fundamental Interactions, 2023, vol. 3-4 (44-45), pp. 108-116.