

## МЕТОД ОРИЕНТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВАРИАЦИЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.О. Гладышев<sup>1</sup>

gladyшев@bmstu.ru

Д.И. Портнов<sup>1</sup>

Д.А. Базлев<sup>2</sup>

М.М. Скобелев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Российская Федерация

---

### Аннотация

Предложен новый метод ориентации, основанный на измерении пространственных вариаций спектральной плотности мощности электромагнитного реликтового излучения. Метод основан на экспериментально обнаруженной дипольной анизотропии реликтового излучения, что приводит к зависимости измеренной температуры излучения от пространственного направления. Выполнена оценка погрешности метода применительно к решению задач навигации и ориентации летательных аппаратов

### Ключевые слова

*Реликтовое излучение, дипольная анизотропия, навигация, ориентация, летательный аппарат*

Поступила в редакцию 13.02.2017  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

**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 (РИ) 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 (экваториальные координаты  $\alpha = 11\text{h } 12\text{m}$  и  $\delta = -7,1^\circ$  (epoch J2000); галактические координаты  $l = 264,26^\circ$  и  $b = 48,22^\circ$ ). В противоположном направлении созвездия Водолея температура на столько же ниже средней температуры.

Основной гипотезой, объясняющей дипольную компоненту распределения температуры во Вселенной, является эффект Доплера, возникающий при движении Солнечной системы относительно реликтового фона со скоростью примерно 370 км/с в сторону созвездия Льва.

Распределение температуры на небесной сфере постоянно во времени и представляет собой стабильное навигационное поле, что можно использовать

при решении задач автономной навигации летательных аппаратов. Подобно существующим звездным датчикам, использующим в качестве эталона карту звездного неба, карта РИ могла бы стать эталоном на устройствах ориентации и навигации нового поколения.

В настоящее время существует множество способов ориентации и навигации летательных аппаратов, в основе которых лежат различные физические принципы. Среди них можно выделить инерциальную навигацию с использованием волоконно-оптических гироскопов, или оптических квантовых гироскопов, навигацию с применением датчиков звездной ориентации и др. Однако каждый существующий метод имеет собственные недостатки, поэтому зачастую необходимо использовать интегрированные системы ориентации и навигации, основанные на использовании нескольких физических принципов.

Одним из перспективных направлений в области ориентации и навигации является использование эффекта анизотропии электромагнитного излучения в движущихся средах [7–9], который построен на инвариантных свойствах уравнений электродинамики в материальной среде. Предложенный в указанных работах метод искусственно создает анизотропию с помощью ускоренно движущегося оптически прозрачного диэлектрика.

В настоящей работе предложено использовать естественную анизотропию температуры электромагнитного излучения, существующего в околоземном пространстве.

**Оценка погрешности метода.** Наиболее точные измерения спектра космического реликтового излучения были получены с помощью спектрофотометра дальнего инфракрасного излучения *FIRAS*, установленного на спутнике *COBE*. Они подтвердили соответствие спектра РИ спектру излучения абсолютно черного тела с температурой 2,725 К, что соответствует длине волны 1,9 мм.

Разность температур наиболее холодной и горячей областей составляет 6,706 мК и вызвана доплеровским смещением частоты излучения вследствие скорости спутника.

В настоящее время экспериментально достигнутая точность измерения температуры реликтового излучения составляет  $dT \sim 10^{-6}$ . Вместе с тем температура реликтового излучения в противоположных направлениях вдоль дипольной составляющей отличается на  $dT' \sim 10^{-3}$ . Это позволяет сделать вывод о принципиальной возможности определения пространственного направления по измерению температуры РИ. Выполним примерный расчет потенциальной точности такого метода.

Температура излучения в выбранном направлении для тела, движущегося со скоростью  $v$ , равна

$$T(\theta) = T_0 \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{(1-\beta \cos \theta)},$$

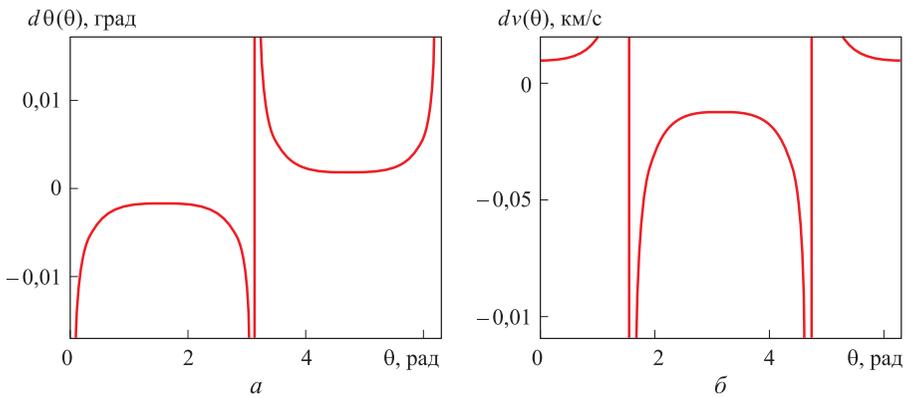
где  $T$  — температура в выбранном направлении;  $T_0$  — температура реликтового излучения в инерциальной системе отсчета (ИСО), которая покоится относи-

тельно излучения;  $\theta$  — угол между вектором  $v$  и направлением наблюдения,  $\beta = |v/c| \ll 1$ .

Для оценки погрешности определения угла  $d\theta$  возьмем производную  $dT/d\theta$  и выразим  $d\theta$ :

$$d\theta = -\frac{dT(1-\beta \cos \theta)^2}{T_0 \beta \sqrt{1-\beta^2} \sin \theta}.$$

Пусть погрешность определения температуры излучения  $dT$ , как упоминалось ранее, составляет  $10^{-7}$  К, скорость движения Солнца в направлении созвездия Льва —  $v = 370$  км/с,  $T_0 = 2,72548$  К, а угол  $\theta = (0^\circ; 360^\circ)$ . Зависимость  $d\theta(\theta)$  приведена на рис. 1, а.



**Рис. 1.** Зависимости погрешности определения угловой координаты летательного аппарата (а) и погрешности определения скорости летательного аппарата (б) от направления измерителя спектральной плотности мощности

Минимальная погрешность определения углового положения вдоль одного направления  $d\theta_{\min} = 5,8''$  достигается, если  $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ . В интервале  $\theta = (5,8...174,2)^\circ \wedge (185,8...354,2)^\circ$  погрешность не превышает  $10d\theta_{\min}$ .

Аналогичный расчет можно провести для определения погрешности вычисления скорости летательного аппарата, для этого возьмем производную  $dT/dv$  и выразим  $dv$ :

$$dv = \frac{c\sqrt{1-\beta^2} (1-\beta \cos \theta)^2 dT}{T_0 [(1-\beta^2) \cos \theta - \beta(1-\beta \cos \theta)]}.$$

Зависимость  $dv(\theta)$  приведена на рис. 1, б.

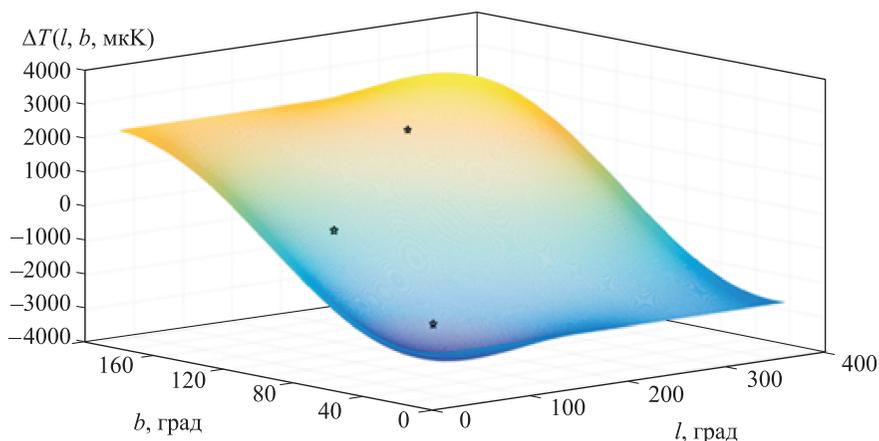
Минимальная погрешность определения скорости  $dv_{\min} = 0,011$  км/с достигается, если  $\theta = 0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ . В интервале  $\theta = (0...84,38)^\circ \wedge (95,62...264,38)^\circ \wedge (274,38...360)^\circ$  погрешность не превышает  $10dv_{\min}$ .

Приведенные оценки в принципе свидетельствуют о том, что РИ может быть использовано в качестве навигационного поля для решения задач ориен-

тации и навигации летательных аппаратов. Наибольшую потенциальную точность метод будет обеспечивать при ориентации устройства измерения спектральной плотности мощности по направлению, где на карте РИ максимальны производные по температуре. Измерения проводят на разных длинах волн (не менее трех), оси которых располагаются не в одной плоскости.

Скорость летательного аппарата вычисляют на основе сравнения температуры РИ на карте и измеренной температуры. В случае движения летательного аппарата в каком-либо направлении изменение температуры в этом направлении будет пропорционально скорости движения.

Для более точных расчетов была выбрана трехмерная модель (рис. 2), содержащая дипольную составляющую анизотропии РИ [10–12].



**Рис. 2.** Моделирование дипольной составляющей РИ (звездочками отмечены опорные направления)

В галактических координатах распределение дипольной анизотропии характеризуется тремя амплитудами  $\Delta T_x$ ,  $\Delta T_y$  и  $\Delta T_z$ :

$$\Delta T(l, b) = \Delta T_x \cos l \cos b + \Delta T_y \sin l \cos b + \Delta T_z \sin b,$$

где  $l$  — галактическая широта;  $b$  — галактическая долгота (галактическая система координат);  $\Delta T$  — средняя температура РИ;  $\Delta T_x = -200$  мкК,  $\Delta T_y = -2216$  мкК,  $\Delta T_z = 2406$  мкК — компоненты.

Для модельных расчетов точности ориентации по РИ были выбраны три опорных направления, значения температуры в которых различны. Галактические координаты направлений:  $b_1 = 41^\circ$ ,  $l_1 = 131^\circ$ ;  $b_2 = 49^\circ$ ,  $l_2 = 179^\circ$ ;  $b_3 = -11^\circ$ ,  $l_1 = 119^\circ$ .

Погрешности определения позиционирования ЛА для каждого этого направления равны  $\Delta_1 = 7,2''$ ,  $\Delta_2 = 9,3''$ ,  $\Delta_3 = 8''$ .

Суммарная погрешность в позиционировании ЛА составит  $\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2}$ , тогда  $\Delta = 14,2''$ . Полученное значение погрешности определения угловых коор-

динат ЛА может быть улучшено путем использования большего числа опорных направлений, а также временем накопления измерений.

**Заключение.** В результате выполненных аналитических и численных оценок можно сделать вывод о возможности использования дипольной составляющей РИ в качестве анизотропного навигационного поля для решения задач навигации и ориентации летательных аппаратов.

Показано, что наибольшую точность метода можно обеспечить в области угловых координат, где на карте РИ максимальны производные по температуре.

Основным преимуществом ориентации по РИ является то, что метод нечувствителен к экранировке каких-то конкретных областей небесной сферы, для его реализации не требуется выбирать и записывать в бортовую память реперные координаты звездных ориентиров. Сравнение результатов измерений может осуществляться с любыми областями эталонной карты РИ. Поскольку пространственное распределение РИ имеет космологическую природу, метод может применяться при длительных межпланетных перелетах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Gamow G.* Det kongelige danske videnskabernes selskab. Mat.-Fis. Medd. 1953. Vol. 27. No. 10. P. 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. DOI: 10.3367/UFNr.0164.199408f.0889
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.* The Relikt-1 experiment — new results // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 1992. Vol. 258. No. 1. P. 37–40. DOI: 10.1093/mnras/258.1.37P
5. *Inoue K.T., Silk J.* Local voids as the origin of large-angle cosmic microwave background anomalies: The effect of a cosmological constant // *Astrophysical Journal.* 2007. Vol. 664. No. 2. P. 650–659. DOI: 10.1086/517603
6. *Гладышев В.О., Гладышева Т.М., Дашко М.И. и др.* Анизотропия пространства скоростей электромагнитного излучения в движущихся средах // *Гиперкомплексные числа в геометрии и физике.* 2006. Т. 3. № 6-2. С. 175–189.
7. *Гладышев В.О.* Необратимые электромагнитные процессы в задачах астрофизики: физико-технические проблемы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 276 с.
8. *Гладышев В.О., Тиунов П.С., Леонтьев А.Д., Шарандин Е.А.* Устройство измерения анизотропии пространства скоростей электромагнитного излучения. Патент РФ № 2498214. Заявл. 22.03.2012, опубл. 10.11.2013.
9. *Насельский П.Д., Новиков Д.И., Новиков И.Д.* Реликтовое излучение Вселенной. М.: Наука, 2003. 390 с.

10. Kogut A., Banday A.J., Bennett C.L., et al. Calibration and systematic error analysis for the COBE DMR 4 year sky maps // *Astrophysical Journal*. 1996. Vol. 470. P. 653.

DOI: 10.1086/177898

11. Kogut A., Banday A.J., Bennett C.L., et al. Tests for non-gaussian statistics in the DMR four-year sky maps // *The Astrophysical Journal Letters*. 1996. Vol. 464. No. 1. P. 29–33.

URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1086/310078/meta#citations>

**Гладышев Владимир Олегович** — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, декан факультета «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Портнов Дмитрий Игоревич** — ассистент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Базлев Дмитрий Анатольевич** — д-р техн. наук, профессор, советник генерального директора Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского (Российская Федерация, 140180, Московская обл., Жуковский, ул. Жуковского, д. 1).

**Скобелев Михаил Михайлович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Подводные роботы и аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, начальник патентного отдела Центра защиты интеллектуальной собственности МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

#### **Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Гладышев В.О., Портнов Д.И., Базлев Д.А., Скобелев М.М. Метод ориентации летательных аппаратов в космическом пространстве на основе измерения пространственных вариаций спектральной плотности мощности реликтового излучения // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2017. № 5. С. 49–56.

DOI: 10.18698/1812-3368-2017-5-49-56

## **TECHNIQUE FOR SPACECRAFT ORIENTATION BASED ON MEASURING SPATIAL VARIATIONS IN THE POWER SPECTRAL DENSITY OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND**

V.O. Gladyshev<sup>1</sup>

gladyshev@bmstu.ru

D.I. Portnov<sup>1</sup>

D.A. Bazlev<sup>2</sup>

M.M. Skobelev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Zhukovskiy Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, Moscow Region, Russian Federation

## Abstract

We suggest a new orientation technique based on measuring spatial variations in the power spectral density of the cosmic microwave background. The technique uses experimentally detected dipole anisotropy of the cosmic microwave background, leading to the radiation temperature being a function of the spatial direction. We estimate the error demonstrated by our technique as applied to solving spacecraft navigation and orientation problems

## Keywords

*Cosmic microwave background, dipole anisotropy, navigation, orientation, spacecraft*

Received 13.02.2017

© BMSTU, 2017

---

## REFERENCES

- [1] Gamow G. Det kongelige danske videnskabernes selskab. Mat.-Fis. Medd. 1953, vol. 27, no. 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. *Physic–Uspekhi*, 1994, vol. 37, no. 8, pp. 813–820.
- [3] Strukov I.A., Bryukhanov A.A., Skulachev D.P., Sazhin M.V. Anisotropy of the microwave background radiation. *Soviet Astronomy Letters*, 1992, vol. 18, pp. 153–156.
- [4] Strukov I.A., Brukhanov A.A., Skulachev D.P., Sazhin M.V. The Relikt-1 experiment — new results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1992, vol. 258, no. 1, pp. 37–40. DOI: 10.1093/mnras/258.1.37P
- [5] Inoue K.T., Silk J. Local voids as the origin of large-angle cosmic microwave background anomalies: The effect of a cosmological constant. *Astrophysical Journal*, 2007, vol. 664, no. 2, pp. 650–659. DOI: 10.1086/517603
- [6] Gladyshev V.O., Gladysheva T.M., Dashko M., et. al. The anisotropy of the space of velocities of the electromagnetic radiation in moving media. *Giperkompleksnyye chisla v geometrii i fizike* [Hyper Complex Numbers in Geometry and Physics], 2006, vol. 3, no. 6-2, pp. 173–187 (in Russ.).
- [7] Gladyshev V.O. Neobratimye elektromagnitnye protsessy v zadachakh astrofiziki: fiziko-tehnicheskie problemy [Irreversible electromagnetic processes in astrophysics problems: Physics-technical issues]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 276 p.
- [8] Gladyshev V.O., Tiunov P.S., Leont'yev A.D., Sharandin E.A. Ustroystvo izmereniya anizotropii prostranstva skorostey elektromagnitnogo izlucheniya. Patent RF № 2498214 [Device for measuring velocity space anisotropy of electromagnetic radiation. Patent RF no. 2498214]. Appl. 22.03.2012, publ. 10.11.2013 (in Russ.).
- [9] Nasel'skiy P.D., Novikov D.I., Novikov I.D. Reliktovoe izluchenie Vselennoy [Relict radiation of the Universe]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 390 p.
- [10] Kogut A., Banday A.J., Bennett C.L., Górski K.M., Hinshaw G., Jackson P.D., Keegstra P., Lineweaver C., Smoot G.F., Tenorio L., Wright E.L. Calibration and systematic error analysis for the COBE DMR 4 year sky maps. *The Astrophysical Journal*, 1996, vol. 470, pp. 653. DOI: 10.1086/177898
- [11] Kogut A., Banday A.J., Bennett C.L., Górski K.M., Hinshaw G., Smoot G.F., Wright E.L. Tests for non-gaussian statistics in the DMR four-year sky maps. *The Astrophysical Journal Letters*, 1996, vol. 464, no. 1, pp. 29–33. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1086/310078/meta#citations>

**Gladyshev V.O.** — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University, Dean of Fundamental Sciences Faculty (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Portnov D.I.** — Assistant Lecturer of Automatic Control Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Bazlev D.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Councillor to Deputy Director, Zhukovskiy Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI) (Zhukovskogo ul. 1, Zhukovskiy, Moscow Region, 140180 Russian Federation).

**Skobelev M.M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Underwater Robots and Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University, Head of Patent Department, Center for Intellectual Property Protection, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Gladyshev V.O., Portnov D.I., Bazlev D.A., Skobelev M.M. Technique for Spacecraft Orientation based on Measuring Spatial Variations in the Power Spectral Density of the Cosmic Microwave Background. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2017, no. 5, pp. 49–56.

DOI: 10.18698/1812-3368-2017-5-49-56