

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 520.6.07

## ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ И ВЛИЯНИЯ НЕСФЕРИЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ КА «МЕТЕОР-М» № 2-2

Ю. М. Гандлевский, А. В. Мельников,  
Е. Н. Михайлов, А. Е. Рабовский

**В** статье приведен анализ данных, полученных с построителя местной инфракрасной вертикали системы ориентации космического аппарата «Метеор-М» № 2-2. Рассмотрены составляющие погрешности определения угла отклонения космического аппарата от местной вертикали за счет несферичности Земли и яркостных вариаций инфракрасного горизонта Земли. Определены показатели эффективности коррекции яркостной погрешности в блоке обработки информации прибора.

**Ключевые слова:** системы ориентации и навигации, построитель местной вертикали, инфракрасное излучение Земли, несферичность Земли.

### Введение

Космический аппарат (КА) «Метеор-М» № 2-2 был запущен в июле 2019 г., на этом объекте были установлены два построителя местной вертикали (ПМВ) 8201-В4М в целях холодного резервирования. Вследствие того, что внесенная в прибор кривая поправок не позволила осуществить коррекцию яркостной погрешности, выходные сигналы приборов отражали вариации яркости поверхности Земли в зоне ее визирования.

В качестве основного прибора ориентации КА используется звездный датчик, а ПМВ работает в телеметрическом режиме. Поскольку точность звездного датчика достаточно высока [1], можно считать, что выходные сигналы датчика вертикали по каналам крена и тангажа определяются двумя факторами: геометрическим – несферичностью Земли, и энергетическим – вариациями энергетической яркости визируемой поверхности [2].

Целью данной работы является оценка эффективности используемой для компенсации влияния яркостной погрешности ПМВ поправочной кривой. Для этого был проведен частотный анализ сигналов телеметрии и выявлено соотношение гармоник, позволяющее судить о правильности выбора поправочной кривой.

На рис. 1 приведены выходные сигналы прибора по каналам крена и тангажа за 5 часов полета за КА (сеанс 229, 21 июля 2019 г.). На рисунке приведена также высота КА от плоскости экватора – параметр, позволяющий привязать угловое положение КА на орбите: нулевое значение этого параметра соответствует прохождению экватора, максимум – Северному, а минимум – Южному полюсу.

Для сравнения на рис. 2 приведена анало-

гичная картина для прибора, установленного на КА «Метеор-М» № 2, у которого коррекция яркостной погрешности проводилась нормально и выходные сигналы определялись в основном геометрической погрешностью из-за несферичности Земли.

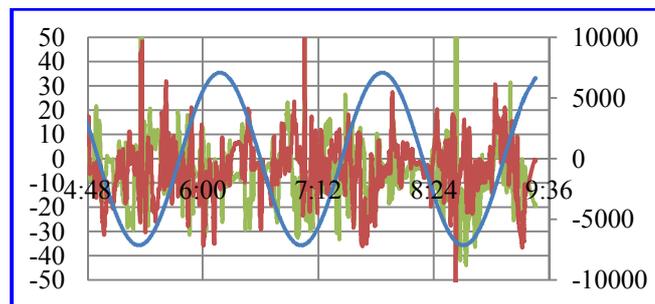


Рис. 1. Выходные сигналы: угол отклонения по крену (УОК) и угол отклонения по тангажу (УОТ) прибора 8201-В4М на КА «Метеор-М» № 2-2, сеанс 229 от 21.07.2019 (— — высота полета КА, км; — — УОК, угл. мин.; — — УОТ, угл. мин.)

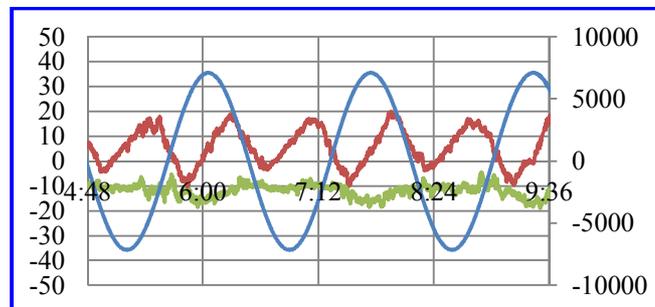


Рис. 2. Выходные сигналы: угол отклонения по крену (УОК) и угол отклонения по тангажу (УОТ) прибора 8201-В4М на КА «Метеор-М» № 2, сеанс 121163 от 11.11.2016 (— — высота полета КА, км; — — УОК, угл. мин.; — — УОТ, угл. мин.)

**1. Вариации выходных сигналов прибора под влиянием геометрических факторов.** Прибор 8201-В4М [2] представляет собой оптико-электронный построитель местной вертикали, малое мгновенное поле которого пересекает инфракрасный (ИК) горизонт Земли в 4-х точках [3]. Спектральный рабочий диапазон прибора ограничен фильтром, пропускающим излучение в диапазоне от 6 до 20 мкм.

Геометрическая вертикаль определяется как биссектриса двух касательных лучей, проведенных из центра масс КА в направлении двух противоположащих засечек; она отличается от направления на центр Земли на величину погрешности из-за несферичности Земли (рис. 3).

Определим величину погрешности из-за несферичности в меридиональной плоскости. Земля имеет форму, достаточно точно аппроксимируемую эллипсоидом GRS80. Для определенной широты подспутниковой точки  $\Pi_0$  находим широты двух противоположащих точек визирования  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ :  $\Pi_1 = \Pi_0 - (90^\circ - \varphi_0)$ ;  $\Pi_2 = \Pi_0 + (90^\circ - \varphi_0)$ , где  $\varphi_0$  – угол визирования на край горизонта. Для высоты полета КА «Метеор-М», равной  $H = 835$  км, этот угол равен:  $\varphi_0 = \arcsin(R/(R + H)) = 62^\circ 09'$ .

Радиусы эллипса меридионального сечения равны [4]:

$$R_1 = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\cos \Pi_1}{R_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin \Pi_1}{R_{\Pi}}\right)^2}};$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\cos \Pi_2}{R_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin \Pi_2}{R_{\Pi}}\right)^2}}.$$

Длина луча наклонного визирования на горизонт  $L = \sqrt{H(2R + H)}$ , где  $R = 6371$  км – средний радиус Земли;  $R_3 = 6378$  км – максимальный (экваториальный) радиус;  $R_{\Pi} = 6357$  км – минимальный (полярный) радиус.

Меридиональная составляющая погрешности за счет несферичности Земли равна:

$$(\Delta\beta_{\text{нсф}})_{\text{м}} = 1/2[\arctg((R_1 - R)/L) - \arctg((R_2 - R)/L)].$$

Для разложения погрешности  $(\Delta\beta_{\text{нсф}})_{\text{м}}$  на креновую и тангажную составляющие обратимся к рис. 4.

Из прямоугольного сферического треугольника  $ABC$  (угол  $C$  равен  $90^\circ$ ) для орбитального угла  $\Omega$ , измеренного в плоскости орбиты от ее восходящего узла (точка  $A$ ), и угла наклона орбиты  $I$ , угол  $B$  между направлением вдоль меридиана и вдоль

плоскости орбиты (в которой лежит ось  $X$  связанной системы координат КА) равен:

$$B = \arctg[\cos I / (\sin I \times \cos \Omega)].$$

Составляющие ошибки  $(\Delta\beta_{\text{нсф}})_{\text{м}}$  по тангажу и крену КА равны:

$$(\Delta\beta_{\text{нсф}})_{\text{т}} = (\Delta\beta_{\text{нсф}})_{\text{м}} \times \cos B;$$

$$(\Delta\beta_{\text{нсф}})_{\text{к}} = (\Delta\beta_{\text{нсф}})_{\text{м}} \times \sin B.$$

В таблице приведены величины составляющих ошибки из-за несферичности Земли для КА «Метеор-М» № 2, рассчитанные для высоты орбиты  $H = 835$  км и наклона орбиты  $I = 98,8^\circ$ .

Из таблицы следует, что тангажная составляющая погрешности представляет собой гармоническую функцию с двойной орбитальной частотой  $2W$  и амплитудой  $T_k \approx 8,64$  угл. мин; креновая составляющая имеет орбитальную частоту  $W$  и амплитуду  $K_k \approx 2,73$  угл. мин. Из-за систематического характера погрешности она может быть скомпенсирована алгоритмическим путем.

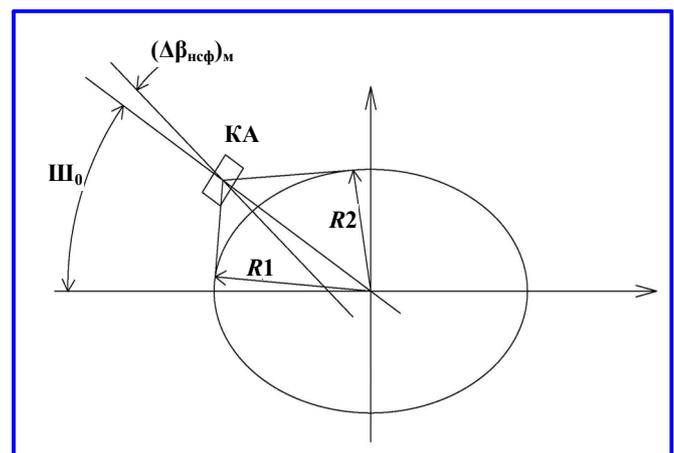


Рис. 3. К определению погрешности из-за несферичности Земли

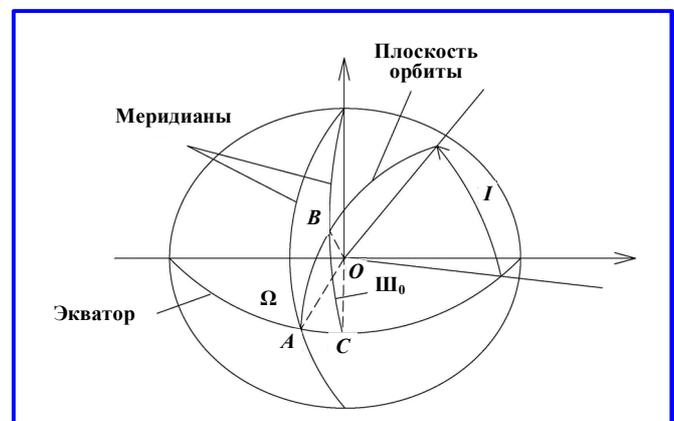


Рис. 4. Разложение ошибки несферичности на креновую и тангажную составляющие

Таблица

Погрешность из-за несферичности Земли

| Орбитальный угол $\Omega$ , град. | Меридиональная составляющая, угл. мин | Тангажная составляющая, угл. мин | Креновая составляющая, угл. мин |
|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 0                                 | 0                                     | 0                                | 0                               |
| 15                                | 4,39                                  | 4,33                             | 0,71                            |
| 30                                | 7,62                                  | 7,49                             | 1,37                            |
| 45                                | 8,86                                  | 8,64                             | 1,94                            |
| 60                                | 7,84                                  | 7,47                             | 2,37                            |
| 75                                | 5,05                                  | 4,31                             | 2,64                            |
| 90                                | 2,73                                  | 0                                | 2,73                            |

**2. Вариации выходных сигналов прибора под влиянием геометрических факторов.** На рис. 1, и особенно на рис. 2, заметна гармоническая зависимость выходных сигналов: первая гармоника с орбитальной частотой – сигнал отклонения по крену, и вторая гармоника – по тангажу. Эта зависимость отчетливо видна на рис. 2 для прибора, установленного на КА «Метеор-М» № 2 (где яркостные погрешности скорректированы). На рис. 1 для прибора с КА «Метеор-М» № 2-2 более заметны случайные вариации сигналов из-за неоднородных погодных условий.

Для исследования пространственно-энергетических характеристик ИК-горизонта Земли проведем амплитудно-частотный анализ выходных сигналов прибора 8201-В4М, установленного на КА «Метеор-М» № 2-2, для сеанса 229, 21.07.19.

Для этого используем гармонический анализ Фурье, рассматривая функции выходных сигналов прибора по крену и тангажу  $T(t)$  и  $K(t)$  как суммы гармоник [4]:

$$T(t) = \frac{T_0}{2} + \sum_{n=1} [a_n \cos(nWt) + b_n \sin(nWt)];$$

$$K(t) = \frac{T_0}{2} + \sum_{n=1} [c_n \cos(nWt) + d_n \sin(nWt)],$$

где  $W$  – орбитальная частота обращения КА, равная  $W = 2\pi/T$ , где  $T = 101$  мин – период обращения КА «Метеор-М».

Коэффициенты тригонометрических рядов Фурье определяются по формулам:

$$a_n = \frac{2}{T_0} T(t) \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right);$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} T(t) \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right);$$

$$T(n) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2};$$

$$c_n = \frac{2}{T_0} K(t) \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right);$$

$$d_n = \frac{2}{T_0} K(t) \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right);$$

$$K(n) = \sqrt{c_n^2 + d_n^2}.$$

Массивы переменных  $T(t)$  и  $K(t)$  обрабатываются на протяжении полного витка орбиты  $T = 101$  мин = 6060 с с интервалом  $\Delta t = 4$  с.

**3. Анализ амплитудно-частотной характеристики выходных характеристик приборов.** В результате расчета получена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) выходных сигналов  $T(t)$  и  $K(t)$  для прибора, установленного на КА «Метеор-М» № 2-2, которая приведена на рис. 5. Здесь  $k = \omega_{изм}/W$ , т. е. отношение частоты анализа к частоте обращения КА  $W$ .

Для сравнения приведена также амплитудно-частотная характеристика выходных сигналов прибора, установленного на КА «Метеор-М» № 2 (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что тангажная составляющая выходного сигнала, имеет максимум на частоте  $2W$  с амплитудой  $\approx 9'$ . Креновая составляющая имеет максимум на орбитальной частоте  $W$  амплитудой более  $2'$ . Эти величины близки к рассчитанным в п. 1 статьи составляющими  $(\Delta\beta_{нсф})_T$  и  $(\Delta\beta_{нсф})_K$  систематической погрешности из-за несферичности Земли.

На рис. 5 тангажная составляющая на частоте  $2W$  также присутствует, однако ее амплитуда ниже в  $\approx 2$  раза. Зато появились максимумы на частотах от  $15W$  до  $25W$ , связанные с прохождением полей зрения прибора через зоны с переменной яркостью горизонта Земли. При отсутствии коррекции прохождения таких зон вызывает вариации выходных сигналов по тангажу и крену. Частота, при которой имеет место максимум погрешности из-за вариаций яркости, составляет  $20W$ , т. е. период изменения яркостной ситуации на ИК-горизонте равен  $T_n = T/20 = 5$  мин ( $T$  – период обращения КА, равный  $\approx 100$  мин). При скорости обращения КА  $V = 360/T = 3,6$  град./мин, одна зона неоднородности излучения занимает  $\alpha = T_n V = 18^\circ$  по орбитальному углу, что соответствует смещению поля зрения прибора по поверхности Земли на  $\Delta L = (2\pi R/360)\alpha \approx 2000$  км.

Вариации выходных сигналов по каждой оси определяются прохождением зон разной яркости двумя противоположащими полями прибора. Примем, что эти зоны имеют (на поверхности Земли) величину  $\Theta_{\Delta B}$ . Для двух противоположащих полей суммарная дисперсия величин зон неоднородности яркости будет равна:  $D(\Theta_{\Delta B1, \Delta B2}) = D(\Theta_{\Delta B1}) + D(\Theta_{\Delta B2}) + 2K_{DB1,2}$ . В связи с большим расстоянием между противоположными полями зрения корреляция между ними ( $K_{DB1,2}$ ) равна 0; считая дисперсии величин противоположащих зон неоднородности одинаковыми, получим:  $D(\Theta_{\Delta B1, \Delta B2}) = 2D(\Theta_{\Delta B})$ .

Отсюда среднеквадратическое значение величины зоны яркости равно:

$$\sigma(\Theta_{\Delta B1, \Delta B2}) = \sqrt{2} \sigma(\Theta_{\Delta B}).$$

Отсюда можно сделать вывод, что среднеквадратический размер одной зоны неоднородности равен:

$$\sigma(\Theta_{\Delta B}) = \Delta L / \sqrt{2} = 1414 \text{ км.}$$

Приняв зону неоднородности за круг с диаметром  $\sigma(\Theta_{\Delta B})$ , получим, что среднеквадратический радиус корреляции вариаций яркости ИК-горизонта Земли в широком спектральном диапазоне (6 – 20 мкм) составляет  $\approx 700$  км.

Из рис. 6 видно, что при правильно работающей системе коррекции яркостных погрешностей в приборе 8201-В4М остаточная яркостная составляющая погрешности невелика: амплитуда погрешности прибора по тангажу на частоте  $20 \text{ } W T(n)20 \approx 0,4'$ . Реальный разброс сигнала на рис. 2 больше за счет других составляющих погрешности, например, погрешности из-за вариации высоты излучающей атмосферы; эта погрешность не поддается коррекции.

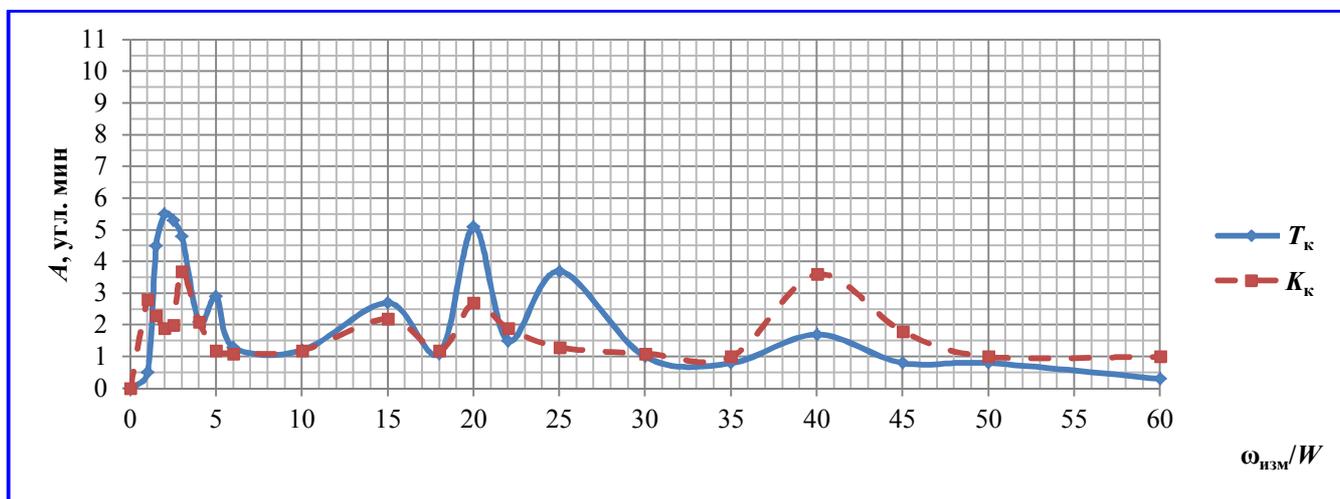


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика выходных сигналов крена и тангажа УОК и УОТ телеметрии прибора 8201 В4М на КА «Метеор-М» № 2-2, сеанс 229 от 21.07.2019

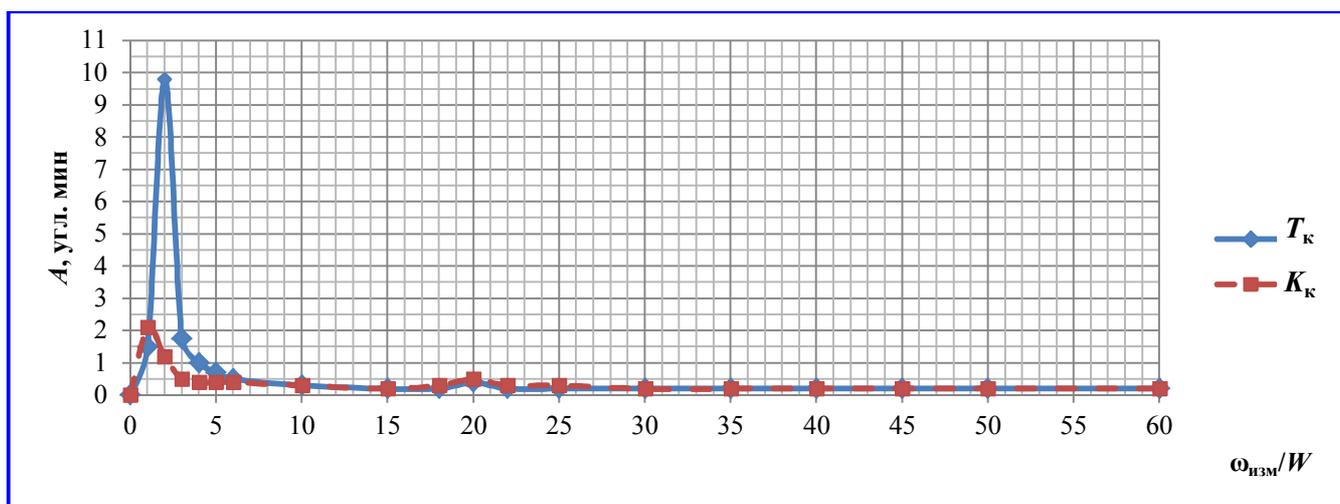


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика выходных сигналов крена и тангажа УОК и УОТ телеметрии прибора 8201-В4М на КА «Метеор-М» № 2, сеанс 121163 от 11.11.2016

Из рис. 5 видно, что при частоте 20W амплитуда погрешности  $T(n)20 \approx 5'$ ; при отсутствии коррекции по яркости.

Эта частота соответствует среднеквадратическому радиусу корреляции вариаций яркости ИК-горизонта Земли  $\approx 700$  км для широкого диапазона спектра (6 – 20 мкм).

### Заключение

Рассмотрены составляющие погрешности определения угла отклонения КА за счет несферичности Земли и яркостных вариаций ИК-горизонта Земли. Установлено, что величина погрешности из-за несферичности Земли ПМВ 8201-В4М составляет 9 угл. мин для высоты полета 800 км с учетом применения в алгоритме в качестве модели Земли эллипсоида GRS80. Из-за систематического характера погрешности она может быть скомпенсирована алгоритмическим путем.

Для исследования пространственных характеристик вариаций ИК-излучения поверхности Земли был использован амплитудно-частотный анализ выходных сигналов ПМВ типа 8201-В4М на КА «Метеор-М» № 2 и № 2-2. Этот же метод предлагается использовать для оценки эффективности поправочной кривой путем соотнесения амплитуд АЧХ выходных сигналов крена и тангажа для второй и двадцатой гармоник. Результаты анализа показали, что введение в алгоритм обработки информации поправочной кривой, позволяет существенно снизить погрешность за счет яркостных вариаций

излучения поверхности Земли до величин, не превышающих 3 угл. мин.

В результате анализа частотных характеристик выходных сигналов ИК ПМВ был определен среднеквадратический радиус корреляции вариаций яркости поверхности Земли ( $\approx 700$  км) в широком спектральном диапазоне, который является существенной характеристикой пространственного распределения метеорологических вариаций яркости у горизонта.

### Литература

1. Анализ современного состояния и перспектив развития приборов звездной ориентации семейства БОКЗ / Г. А. Аванесов, Р. В. Бессонов, А. А. Форш [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 1. – С. 3 – 13.
2. Оценка точности инфракрасных построителей местной вертикали по результатам летных испытаний / Ю. М. Гандлевский, Е. Н. Михайлов, Ю. С. Мосолова [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2014. – Т. 141. – № 4. – С. 31 – 38.
3. Федосеев В. И., Колосов М. П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Оптотехника» и специальности «Оптико-электронные приборы и системы» / В. И. Федосеев, М. П. Колосов. – Москва : Логос, 2007. – 247 с.
4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. Для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – 7-е изд., стереотипное. – Москва : Гостехиздат, 1957. – 608 с.

Поступила в редакцию 27.11.2019

**Юрий Моисеевич Гандлевский**, ведущий инженер-конструктор.  
**Александр Викторович Мельников**, инженер 1 категории, e-mail: melnikov20082009@yandex.ru.  
**Евгений Николаевич Михайлов**, кандидат технических наук,  
 начальник Оптического научно-производственного центра.  
**Александр Ефимович Рабовский**, кандидат технических наук,  
 старший научный сотрудник, e-mail: Raskiy@mail.ru.  
 Т. (495) 366-33-92.  
 (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

## ASSESSMENT OF SPACIAL DISTRIBUTION OF EMISSION HETEROGENEITY AND IMPACT OF THE EARTH SURFACE NON-SPHERICITY BASED ON THE RESULTS OF «METEOR-M» № 2-2 SC FLIGHT TESTS

Iu. M. Gandlevskii, A. V. Melnikov,  
 E. N. Mikhailov, A. E. Rabovskii

The article presents the analysis of data received from the plotter of the local infrared vertical of Meteor № 2-2 spacecraft attitude control system. The article describes the components of the error in determination of the spacecraft angle of deviation from the local vertical due to

the Earth non-sphericity and brightness variations of the Earth infrared horizon. The indices of efficiency of the brightness error correction in the device data processing unit are defined.

**Key words:** attitude control and navigation systems, local vertical plotter, the Earth infrared radiation, the Earth non-sphericity.

### References

1. Analysis of current state and development prospects of BOKZ star trackers family / G. A. Avanesov, R. V. Bessonov, A. A. Forsh [et. al.] // Journal of Instrument Engineering. – 2015. – V. 58. – No. 1 – Pp. 3 – 13.
2. Assessment of accuracy of the infrared local vertical plotters based on the results of flight tests / Iu. M. Gandlevskii, E. N. Mikhailov, Iu. S. Mosolova [et. al.] // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings, 2014 – V. 141 – No. 4 – Pp. 31 – 38.
3. Optoelectronic devices for attitude control and navigation of spacecrafts: Study Guide for students of Higher Education Institutions studying ‘Optical engineering’ with qualification in ‘Optoelectronic devices and systems’ / V. I. Fedoseev, M. P. Kolosov. – Moscow: Logos, 2007. – P. 247.
4. Guide book to Mathematics. For engineers and students of higher institutions / I. N. Bronstein, K. A. Semendiaev. – Edition No.7, stereotype. – Moscow: Gostechizdat, 1957. – P. 608.

**Iurii Moiseevich Gandlevskii**, *Leading Design Engineer.*

**Aleksandr Viktorovich Melnikov**, *Engineer (1<sup>st</sup> category), e-mail: melnikov20082009@yandex.ru.*

**Evgenii Nikolaevich Mikhailov**, *Candidate of Technical Sciences (Ph. D),  
Head of Optical Research and Production Center.*

**Aleksandr Efimovich Rabovskii**, *Candidate of Technical Sciences (Ph. D),  
Senior Researcher, e-mail: Raskiy@mail.ru.*

*T. (495) 366-33-92.*

*(JC «VNIEM Corporation»).*