Физика

УДК 53.06, 53.08, 53.09 Научная статья

https://doi.org/

**Оценка реактивного некомпенсированного момента оптико-механической системы**

**Д. Ю.** **Ларионов1, И. М.** **Белан2🖂**

1,2Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

2Филиал Корпорации «Комета» ‒ Научно-проектный центр   
оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург, Россия

**🖂** iliyars97@gmail.com,   
https://orcid.org/0000-0002-6202-2331

**Аннотация** В данной статье исследуется реактивный момент, возникающий при вращении оптической системы, расположенной на космическом аппарате. Вращение оптических систем приводит к возникновению реактивного момента, действующего на космический аппарат, который приведет к развороту космического аппарата вокруг его центра тяжести в направлении противоположном перемещению подвижной массы оптической системы. В следствии чего ось визирования оптической системы займет в пространстве некоторое положение, не совпадающее с заданными углами на перенацеливание. Особенно сильно влияние реактивных моментов и сил в случае инфракрасных оптических систем имеющими значительный вес и габариты. Измеряется величина этого момента и показан способ его компенсации. Патентный поиск показал отсутствие готовых способов для проведения подобных измерений. В данной статье представлена оригинальная методика измерений реактивного момента.

**Ключевые слова:** реактивный момент, косвенные измерения, измерительный стенд, лазерный гироскоп.

**Для цитирования:** Ларионов Д. Ю., Белан И. М. Оценка реактивного некомпенсированного момента оптико-механической системы //

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Physics

Original article

**Evaluation of the reactive uncompensated moment of an optical-mechanical system**

**D. Y. Larionov1, I. M. Belan1,2🖂**

1, 2Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

2Branch of the Kometa Corporation - Research and Design Center

optoelectronic surveillance complexes, St. Petersburg, Russia

**🖂**vanov@gmail.com,   
http://orcid.org/0000-0002-5237-9118

**Abstract**

This article examines the reactive torque that occurs during the rotation of an optical system located on a spacecraft. The rotation of optical systems leads to the emergence of a reactive torque acting on the spacecraft, which will lead to a rotation of the spacecraft around its center of gravity in the direction opposite to the movement of the moving mass of the optical system. As a result, the sighting axis of the optical system will take a certain position in space that does not coincide with the specified angles for retargeting. The influence of reactive moments and forces is especially strong in the case of infrared optical systems that have significant weight and dimensions. The magnitude of this moment is measured and a method for compensating it is shown. A patent search showed the absence of ready-made methods for carrying out such measurements. This article presents an original method for measuring reactive torque.

**Keywords:** reactive torque, indirect measurements, measuring stand, laser gyroscope.

**For citation:** Larionov D. Y., Belan I. M. Evaluation of the reactive uncompensated moment of an optical-mechanical system //

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Физика  
Physics

***Введение.*** Реактивный остаточный момент оказывает негативное влияние на стабилизацию квадрокоптеров [1], вертолетов [2] и космических аппаратов [3,4]. Реактивный момент, возникающий при вращении подвижной части оптико-механической системы (ОМС), расположенной на летательном аппарате, приводит к вращению всего аппарата в противоположную сторону [5], что вызывает смещение оси визирования от заданного положения. Для устранения этого явления необходимо влияние реактивного момента свести к минимуму и ввести дополнительные поправки в процессе управления позиционированием визирующей оси.

Возможным способом решения этой проблемы является компенсация с помощью дополнительного маховика, установленного соосно с основным двигателем. Маховик должен вращаться в противоположную сторону. Таким образом, момент от маховика компенсирует момент от основного двигателя. Для подбора момента инерции и алгоритма разгона компенсирующего маховика должен быть известен нескомпенсированный момент. Аналитического расчета бывает недостаточно из-за погрешности изготовления подвижных частей оптико-механической системы. Таким образом, целью настоящей работы измерение реактивного момента для дальнейшей компенсации.

***Математическое описание реактивных моментов при вращении оптико-механической системы.*** Особенностью конструкции исследуемое ОМС является несовпадение точки пересечения осей кардана с центром тяжести подвижного зеркального блока. Обозначим расстояние между этими точками за *r* (рисунок 1). Рассмотрим результат воздействия реактивных моментов на основание космического аппарат (КА) с учётом расположения центра вращения кардана ОМС относительно центра тяжести КА. Свяжем с точкой центра масс *O*0 космического аппарат неподвижную систему координат *О*0*X*0*Y*0*Z*0. С центром кардана свяжем систему координат *ОXYZ*, развёрнутую относительно неподвижной системы координат на углы *А* и *В*. Редукторный привод кардана, установленный на оси *ОY*0, неподвижен, а второй редукторный привод, установленный на оси *ОZ*0, имеет возможность разворачиваться на угол *А* вместе с внутренней рамой кардана. Узел зеркал неуравновешен относительно внутренней оси кардана. Центр масс узла зеркал *О*1 смещён относительно центра кардана на расстояние *r*. Центр кардана *О* имеет координаты *Rx, Ry, Rz* в неподвижной системе координат *О*0*X*0*Y*0*Z*0. Для разворота узла зеркал на углы *А* и *В* по соответствующим осям создаются моменты *Mda* и *Mdb* при помощи приводов.



Эти моменты одновременно приводят в движение компенсационные маховики приводов и узел зеркал. В свою очередь, узел зеркал (с подвижными элементами кардана) имеет собственные моменты инерции *Jda* и *Jdb* относительно осей, связанных с центром кардана. К центру масс узла зеркал будут приложены силы *Fa* и *Fb*, приводящие узел зеркал в движение, тогда к основанию КА в точке, соответствующей центру карданова подвеса, будут приложены силы *Fa* и *Fb*, направленные в противоположную сторону. Если центр масс КА (точка *О*0) и центр кардана (точка *О*) не совпадают, то к КА будут приложены реактивные моменты, вызванные силами *Fa* и *Fb*. С другой стороны, двигатели приводов приводят во вращение маховики, что сопровождается возникновением соответствующих моментов *Mma* и *Mmb* реакции на КА. Результирующие реактивные моменты можно рассчитать как сумму всех перечисленных воздействий. Сканирующее зеркало связано кинематически с зеркальным блоком через рычажный механизм, который с высокой точностью делит угол поворота *В* зеркального блока на 2 и поворачивает сканирующее зеркало на угол *В*/2 вокруг оси *OZ*. Этот поворот осуществляется тем же приводом по оси OZ. Поэтому момент инерции сканирующего зеркала может быть включён в момент инерции *Jdb*. Таким образом, к основанию приложены реактивные моменты, некоторые из которых можно представить в виде соответствующих пар сил:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

*r-* расстояние между пересечением осей карданова подвеса и центром тяжести блока зеркал

Моменты определяются как: 

где *Jma*, *Jmb* – моменты инерции компенсационных маховиков, установленных по осям *OY* и *OZ;*

ε*da,* ε*db* – угловые ускорения подвижных частей кардана по соответствующим углам поворота;

ε*ma,* ε*mb* – угловые ускорения маховиков по соответствующим углам поворота;

Спроецируем силы *Fa* и Fb, приложенные к центру кардана, на оси неподвижной системы координат *О0X0Y0Z0*:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Нетрудно показать, что эти силы, приложенные к КА в точке *O*, создадут моменты относительно центра масс *О*0. С учётом (1) для проекций момента возмущения на оси КА получим:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Поставим уравнения (2) в (3). Получим

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

В уравнениях (4) проекции моментов на оси состоят из суммы двух частей моментов, возникающих от смещения центра кардана относительно центра масс КА (слагаемые, содержащие *Rx, Ry, Rz*) и моментов, возникающих из-за неполной компенсации моментов двигателей моментами соответствующих маховиков.

**Пример расчета реактивных моментов**

*Mx*0, *My*0, *Mz*0 – суммарные значения реактивных моментов, действующих на КА по соответствующим осям, рассчитываются по следующим выражениям:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

где *Мхс*, *Myc*, Mz*c*- моменты, возникающие из-за смещения масс КА относительно центра кардана;

*Мх*1, *My*1, Mz1 – моменты, возникающие из-за неполной компенсации реактивных моментов.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |
|  | (7) |

Для расчёта остаточных реактивных моментов, зададимся следующими значениями параметров (таблица 1):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Табл. 1. Исходные данные Tabl. 1. Initial data* | | |
| Параметр | Значение | Размерность |
| *Jda* | 2,84 | кг·м2 |
| *Jdb* | 1,9 | кг·м2 |
| *Jma* | 0,0169 | кг·м2 |
| *Jmb* | 0,0113 | кг·м2 |
| *r* | 0,3 | м |
| *Rx* | 1,212 | м |
| *Ry* | 0,28 | м |
| *Rz* | 0,015 | м |
| *A* | 0,0873 | рад |
| *B* | 0,0873 | рад |
| *εa* | 0,127 | рад/c2 |
| ε*b* | 0,127 | рад/c2 |

Пользуясь формулами (1)..(7) и исходными данными таблицы 1 расчитаем итоговые реактивные моменты (таблица 2)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Табл. 2. Результаты расчета Tabl. 2. Calculation results* | | |
| Параметр | значение | размерность |
| *Mda* | 0,3607 | Н·м |
| *Mdb* | 0,2413 | Н·м |
| *Fa* | 0,0504 | Н |
| *Fb* | 0,0378 | Н |
| *Fx* | 0,0077 | Н |
| *Fy* | 0,0377 | Н |
| *Fz* | 0,0499 | Н |
| *Mxс* | 0,0145 | Н·м |
| *Myс* | 0,0606 | Н·м |
| *Mzс* | 0,0456 | Н·м |
| *Mx1* | 0,0013 | Н·м |
| *My1* | 0,0151 | Н·м |
| *Mz1* | 0,0113 | Н·м |
| ***Mx*** | **0,0158** | **Н·м** |
| ***My*** | **0,0757** | **Н·м** |
| ***Mz*** | **0,0569** | **Н·м** |

Таким образом, при заданных параметрах основной вклад в реактивные моменты вносит смещение центра кардана относительно с центра масс КА, поэтому при компоновке КА указанное смещение должно быть минимизировано.

**Измерение реактивного момента.** Для подтверждения расчетных результатов были произведены измерения реактивного момента на измерительном стенде [6]. Стенд (рис. 2) представляет собой металлическую раму, подвешанную на тросе, в которую помещается исследуемая подвижная оптическая система. В качестве средства измерения используются датчик эталонного момента и волоконно-оптический гироскоп. Датчик эталонного момента состоит из моментного двигателя и маховика, суммарный момент инерции которых составляет 2,68/104 кг·м2. Момент инерции и профиль его разгона точно известны и подобраны таким образом чтобы момент равнялся 0,005 Н·м.



Измерения производятся косвенным методом – Реакция стенда на момент, вызванный перемещением оптической системы сравнивается с реакцией на момент от эталонного маховика. Задается тестовое воздействие на стенд эталонным маховиком, в следствии чего рама подвеса совершает колебания, скорость которых регистрирует волоконно-оптический гироскоп рисунок 3.

 ω – скорость колебаний, “/c

1Рис. 3 оформить по Правилам – надписи на рис. должны быть сделаны в ворде шрифтом Times 9 pt так, чтобы их можно было править (в том числе и цифры по осям). Описать ω (размерность правильная? М. б. рад/с?)

Реактивный момент определяется по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| *M = Jε* | (8) |

где *J –* момент инерции стенда; ε – ускорение колебаний.

Для нахождения ускорения продифференциируем график на рисунке 3. График ускорения показан на рисунке 4.

Рис. 4 оформить по Правилам

Так как момент эталонного маховика был точно посчитан можно считать, что ускорение рамы 30 угловых секунд соответсвует моменту 0,005 Н·м.

Далее произведем перемещение оптико-механической системы вокруг оси Z и произведем аналогичные измерения скорости и ускорения колебаний (рисунок 5).

Рис. 5 оформить по Правилам

Максимальное по модулю ускорение составляет 336 ″/c2. Момент определим по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

где ε*о* – ускорение рамы при вращении оптической системы;

ε*m* – ускорение рамы при тестовом воздействии;

*Mm* – момент тестового маховика

Итоговый момент составляет 0,0562 Н·м

Аналогичным способом измеряется момент при перемещении оптической системы по оси *Z.* Для этого оптическая системы устанавливается таким образом чтобы реактивный момент от перемещения вокруг оси Y оказывал влияние на основание подвеса. Графики скорости и ускорения колебаний стенда показаны на рисунке 6.

 Рис. 6 оформить по Правилам

Максимальное по модулю ускорение составляет 452 ″/c2 Итоговый момент, посчитанный по формуле (9) составляет 0,0755 Н·м.

**Заключеине.** В данной работе был посчитан реактивный момент, возникающий при вращении оптической системы, также реактивный момент был измерен на стенде измерения остаточного реактивного момента. Расчетные и измеренные значения совпадают с учетом погрешности измерений, из чего можно сделать вывод о пригодности данного стенда для провидения измерений остаточного реактивного момента. Используя эти измерений становится возможным изменить момент инерции компенсирующих маховиков для большей компенсации реактивного момента.

Список литературы

1. Yoon J., Doh J. Optimal PID control for hovering stabilization of quadcopter using long short term memory // Adv. Eng. Inform. 2022. V.53 P. 101679 <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101679>

2. Lui C. Stabilization control of quadrotor helicopter through matching solution by controlled Lagrangian method // Asian Journ. Control. 2022. V. 24. № 4. P. 1885–1894. https://doi.org/10.1002/asjc.2622

3. Kalenova V.I., Morozov V.M. Novel approach to attitude stabilization of satellite using geomagnetic Lorentz forces // Aerospace Sci. Technol. 2020. V. 106. P. 106105 https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106105

4. Luo C., Wen H., Jin D. Deployment of flexible space tether system with satellite attitude stabilization // Acta Astronautica. 2019 V. 160. P. 240 –250. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.04.036

5. Murakami T., Yu F. Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator // IEEE Trans. Ind. Electron. 1993. V. 40 № 2. P. 259–265. https://doi.org/10.1109/41.222648

6. Белан И.М., Ларионов Ю.П., Ларионов Д.Ю., Стенд измерения остаточного реактивного момента оптико-механической системы // Оптический журнал. 2023.Т. 90. № 7. С. 60–67. [http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-60–67. 60–67](http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-60–67.%2060–67).

Сведения об авторах на русском и английском языке

Информация об авторах

**Белан Илья Михайлович** –аспирант кафедры ЛИНС, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия.

iliyars@mail.ru

http://orcid.org/0000-0002-6202-2331

**Ларионов Даниил Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры ЛИНС Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия.

Larionovdan@yandex.ru

http://orcid.org/0000-0001-6722-9211

Belan Ilya– postgraduate student of the department of LINS, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after. V. I. Ulyanova (Lenin), st. Professora Popova, 5, St. Petersburg, 197376, Russia.

iliyars@mail.ru

http://orcid.org/0000-0002-6202-2331

Larionov Daniil– Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor of the department of LINS St. Petersburg State Electro-Technical University "LETI" named after. V. I. Ulyanova (Lenin), st. Professora Popova, 5, St. Petersburg, 197376, Russia.

Larionovdan@yandex.ru

http://orcid.org/0000-0001-6722-9211