

Проблемы наивного управления ориентацией спутника магнитной катушкой

Федянин Д.Н.

dfedyanin@inbox.ru, dfedyanin.com

Институт проблем управления РАН – Лаборатория активных систем (№57)

Высшая школа экономики – Международная лаборатория логики, лингвистики и формальной философии

IEEE member

Правильная ориентация спутника при движении по орбите важна для фото- и видеосъёмки поверхности земли, астрономических наблюдений и т.д.

Использование магнитной катушки является одним из методов стабилизации ориентации.

Взаимодействие с магнитным полем Земли магнитной катушки спутника приводит к возникновению момента силы.

Таким образом управление величиной тока в магнитной катушке может иногда уменьшать энергию вращения спутника. Это происходит, когда правильным выбором величины магнитного момента совершается отрицательная работа.

Далее будем предполагать, что спутник снабжен устройствами определения своей ориентации, своего вращения (например, гироскоп из немагнитных материалов) и вычисления магнитного поля Земли.

Наивный алгоритм

1. Вычислить магнитные моменты и моменты сил катушки, для трех альтернатив
 1. ток включен в некотором направлении a ,
 2. ток включен в направлении b , противоположном направлению a ,
 3. ток выключен.
2. Для каждой из альтернатив найти предполагаемую изменившуюся энергию вращения спутника.
3. Выбираем ту альтернативу, которое приведет к уменьшению энергии





Hubble Space Telescope Precision Pointing Control System

G. A. Beals,* R. C. Crum,† H. J. Dougherty,‡ D. K. Hegel†, J. L. Kelley§, and J. J. Rodden¶
Lockheed Missiles & Space Co., Inc., Sunnyvale, California

The Hubble Space Telescope has the most stringent pointing requirements imposed on any spacecraft to date. The overall HST pointing stability shall be 0.007 arcsec rms or less. The Pointing Control System uses fine-guidance sensors and rate gyros for attitude reference and rate information. Control torques are provided by reaction wheels. A digital computer collects the sensor data, performs the control law computations, and sends torque commands to the reaction wheels. To attain this precision pointing, improvements were made to the rate gyros to lower their noise characteristics and to the reaction wheels to reduce their induced vibration levels. The control system design was validated in a test sequence that progressed from model verification tests on an air-bearing to operations-oriented, closed-loop testing on the assembled vehicle. A test system is described that allowed the simultaneous production of test-case command loads for the flight computer and plots of predicted profiles to assist in test data analysis. Testing and analysis indicated that the HST will be capable of meeting the requirements for precision pointing.

Nomenclature

FGS	= Fine-Guidance Sensor
FHST	= Fixed-Head Star Tracker
FOV	= Field of View
HSIF	= Hardware/Software Integration Facility
HST	= Hubble Space Telescope
PCS	= Pointing Control System

Introduction

THE NASA Hubble Space Telescope (HST), shown in Fig. 1, is a 2.4-m free-flying telescope designed to allow scientists to observe the universe with a precision and

ing fine pointing. Magnetic torquers are used for momentum management.

The flight digital computer performs computations for the control law, attitude reference, momentum management law, and the command generator, as illustrated in Fig. 2. The PCS control law incorporates a finite-impulse response filter in the rate path to provide an adequate stability margin with respect to the spacecraft structural modes. The position path uses an attitude observer to combine the attitude data derived from the FGS or star trackers with the rate data from the gyros. Momentum management processing uses magnetometers and magnetic torquers to minimize the reaction wheel speeds. The

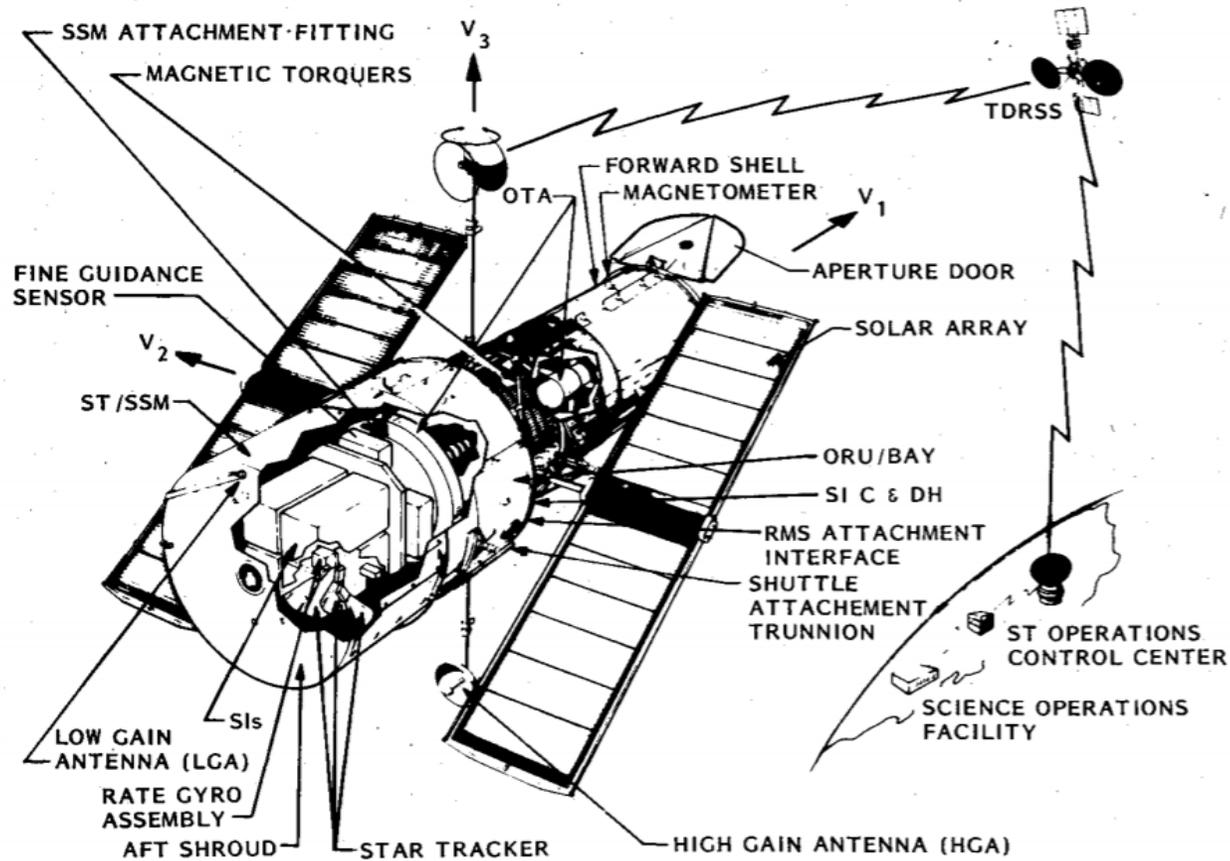


Fig. 1 The Space Telescope system.

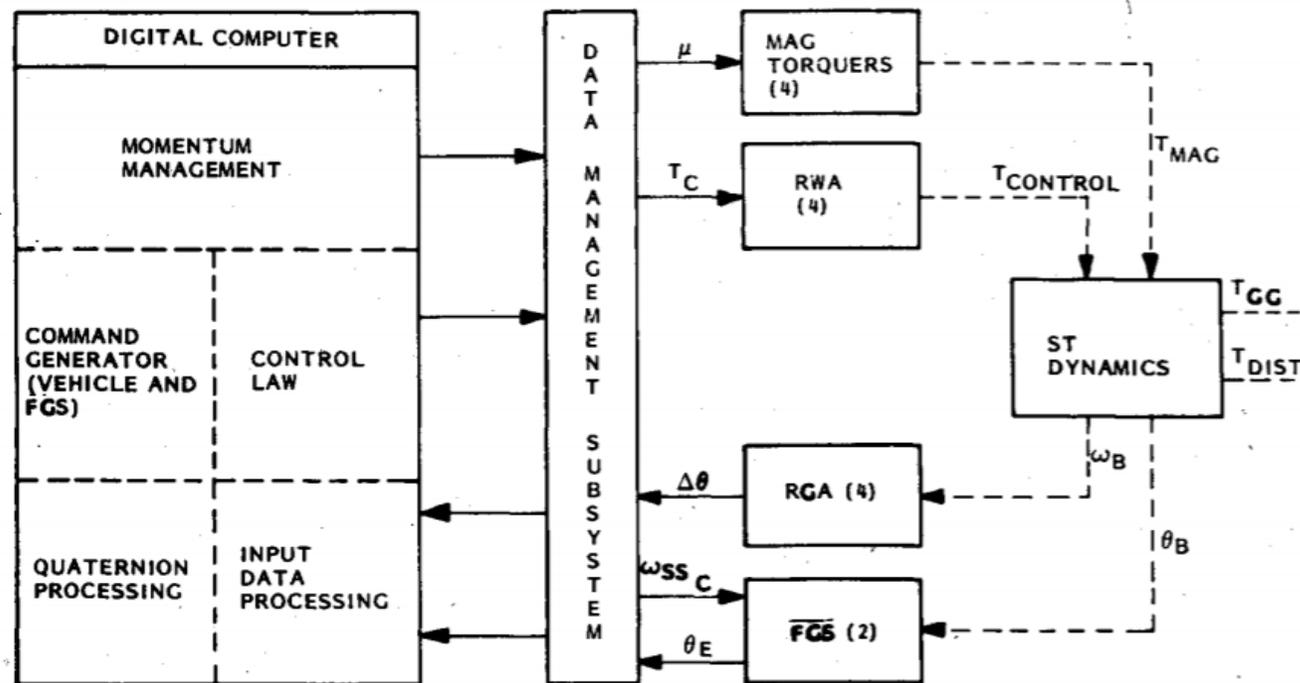


Fig. 2 Primary control system.

Три магнитных катушки позволяют выбирать произвольное направление магнитного момента и соответственно момента силы.

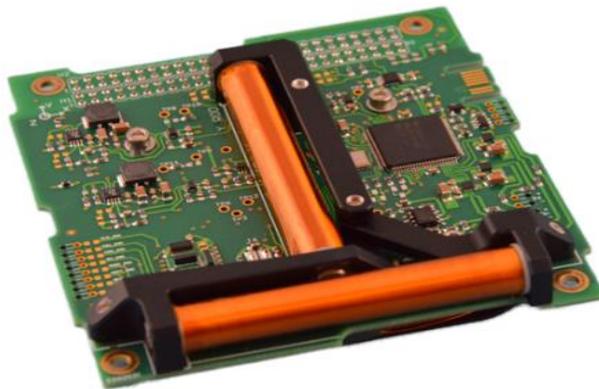
Стабилизация ориентации спутника только одной катушки в общем случае недостаточно. Для этого необходимо использовать дополнительные устройства, например, демпфер, построенный на диссипации энергии через трение



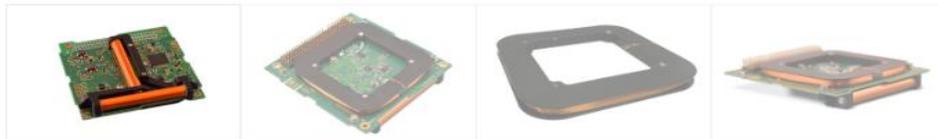
ISIS Magnetorquer Board

Flight Heritage since 2013

€8,000



- Three-axis magnetometer
- Three actuators; two torque rods and one air core torque.
- Current sensors for each torque
- Temperature telemetry of actuators
- Nominal 0.2Am^2 actuation per actuator
- Suitable to detumble up to 12U (~24kg) CubeSats
- Applications
 - CubeSat detumbling & magnetic attitude control
 - Reaction wheel desaturation
- Interface
 - I²C control allows for use in any CubeSat bus
 - Compatible with PC-104 mechanical interface
 - Compatible with most CubeSat structures



📄 Option Sheet

📄 Brochure

📄 IGS

📄 STEP

Availability: 8 – 12 weeks

Quantity:

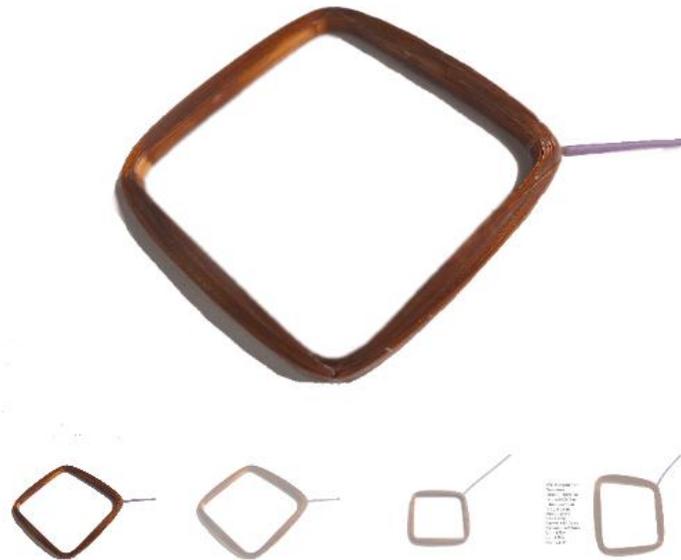
[ADD TO INQUIRY LIST](#)

[GET A QUOTE](#)

Home » Products » Attitude actuators » **MT01 Compact Magnetorquer**

PRODUCT SEARCH

PRODUCT CATEGORIES

[Antenna systems](#)[Attitude actuators](#)[Attitude sensors](#)[Cameras & payloads](#)[Command & data handling](#)[Communication systems](#)[CubeSat kits & buses](#)

MT01 Compact Magnetorquer

Flight heritage since 2013

€800

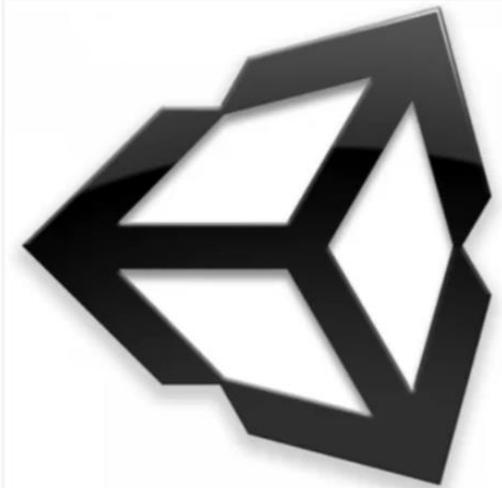
With only 7.5 grams and 3.2 millimeters thickness, the MT01 Compact Magnetorquer is a vacuum core magnetic coil designed for ADCS control in cubesat mission from 1U to 3U that boast an impressive performance compared to its small footprint over the mass, power and area budget of the spacecraft. Even with that small dimensions the MT01 is capable of greater magnetic moments, turn speeds and angular accelerations than comparable products on the market, yet the power usage is kept to a minimum: It can turn a 1U mass 90 degrees in 60 seconds using only 0.2 Watts at a LEO orbit of 500km.

Существенными ограничениями применимости таких устройств являются: слабость магнитного поля Земли, зависимость большинства известных алгоритмов управления от точности определения ориентации спутника и вектора его вращения. Тем не менее, подобные системы довольно распространены.

Наивный алгоритм

1. Вычислить магнитные моменты и моменты сил катушки, для трех альтернатив
 1. ток включен в некотором направлении a ,
 2. ток включен в направлении b , противоположном направлению a ,
 3. ток выключен.
2. Для каждой из альтернатив найти предполагаемую изменившуюся энергию вращения спутника.
3. Выбираем ту альтернативу, которое приведет к уменьшению энергии

Unity 3d



Межплатформенная среда разработки компьютерных игр. Unity позволяет создавать приложения, работающие под более чем 20 различными операционными системами, включая персональные компьютеры, игровые консоли, мобильные устройства, веб-браузеры, интернет-приложения и другие. Выпуск Unity состоялся в 2005 году и с тех пор идёт постоянное развитие. [Википедия](#)

UnityEngine.PhysicsModule

Description

The Physics module implements 3D physics in Unity.

Classes

BoxCollider	A box-shaped primitive collider.
CapsuleCollider	A capsule-shaped primitive collider.
CharacterController	A CharacterController allows you to easily do movement constrained by collisions.
CharacterJoint	Character Joints are mainly used for Ragdoll effects.
Collider	A base class of all colliders.
Collision	Describes a collision.
ConfigurableJoint	The configurable joint is an extremely flexible joint giving you complete control over its movement.
ConstantForce	A force applied constantly.
ControllerColliderHit	ControllerColliderHit is used by CharacterController.OnControllerColliderHit.
FixedJoint	The Fixed joint groups together 2 rigidbodies, making them stick together in space.
HingeJoint	The HingeJoint groups together 2 rigid bodies, constraining them to move like a hinge.
Joint	Joint is the base class for all joints.
MeshCollider	A mesh collider allows you to do collision detection between meshes and primitive colliders.
PhysicMaterial	Physics material describes how to handle colliding objects (friction, bounciness).
Physics	Global physics properties and helper methods.
Rigidbody	Control of an object's position through physics simulation.
SphereCollider	A sphere-shaped primitive collider.

Rigidbody

class in UnityEngine / It

SWITCH TO MANUAL

Description

Control of an object's position

Adding a Rigidbody component to an object will be pulled downward by gravity

The Rigidbody also has a mass property. The mass can be specified in terms of the forces applied to the object and respond correctly to those forces

In a script, the `FixedUpdate` method is used for frame update tasks. The method is called immediately before each frame

A common problem when using physics is that the default gravity settings assume that one world unit is 100 units long but when using physics, they will appear to fall very slowly - the physics engine thinks they are falling at their scale in real life (so a car should be about 4 units)

Rigidbody.inertiaTensor

SWITCH TO MANUAL

```
public Vector3 inertiaTensor;
```

Description

The diagonal inertia tensor of mass

The inertia tensor is rotated by the transform of the rigidbody. You can reset the inertia tensor

```
// Expose tensor of inertia to  
// the inspector.  
using UnityEngine;  
using System.Collections;  
  
public class ExampleClass : MonoBehaviour  
{  
    public Vector3 inertiaTensor;  
    public Rigidbody rb;  
    void Start()  
    {  
        rb = GetComponent<Rigidbody>();  
        rb.inertiaTensor = inertiaTensor;  
    }  
}
```

Rigidbody.inertiaTensorRotation

SWITCH TO MANUAL

```
public Quaternion inertiaTensorRotation;
```

Description

The rotation of the inertia tensor.

If you don't set inertia tensor rotation from a script it will be calculated automatically from all colliders attached to the object to rotate realistically

```
// Resets the inertia tensor to be the coordinate system of the transform  
  
using UnityEngine;  
using System.Collections;  
  
public class ExampleClass : MonoBehaviour  
{  
    void ResetTensor()  
    {  
        GetComponent<Rigidbody>().inertiaTensorRotation = Quaternion.identity;  
    }  
}
```

object will be

can be specified in terms of the forces applied to the object and respond correctly to those forces

and for most other physics tasks. The `FixedUpdate` method is called immediately before each frame

for your models. The default gravity settings assume that one world unit is 100 units long but when using physics, they will appear to fall very slowly - the physics engine thinks they are falling at their scale in real life (so a car should be about 4 units)



Unity Inspector window showing the configuration for the 'maggellan A' object in a scene. The scene displays a satellite in orbit above Earth.

Hierarchy: sat20-A* > maggellan A

Inspector:

- Rect Transform:**
 - Pos X: 3.209944, Pos Y: -1.042253, Pos Z: 3.865996
 - Width: 100, Height: 100
 - Pivot: X 0.5, Y 0.5
 - Rotation: X 10, Y 90, Z 180
 - Scale: X 1, Y 1, Z 1
- Rigidbody:**
 - Mass: 1
 - Drag: 0
 - Angular Drag: 0
 - Use Gravity:
 - Is Kinematic:
 - Interpolate: Interpolate
 - Collision Detection: Discrete
- Torq (Script):**
 - Script: Torq
 - Torque: 100
 - H: 0, V: 0, Fx: 0, Fy: 1, A: 0, B: 0
 - Rb: maggellan A (Rigidbody)
- Automotive (Script):**
 - Script: Automotive
 - Torque: 1000
 - H: 0, V: 0, Fx: 0, Fy: 6, A: 0, B: 0
 - Rb: maggellan A (Rigidbody)
 - V1: X 0, Y 0, Z 0; Omega: X 0, Y 0, Z 0
 - M: 0, S: 0, T: 0
 - TCYCL: 1

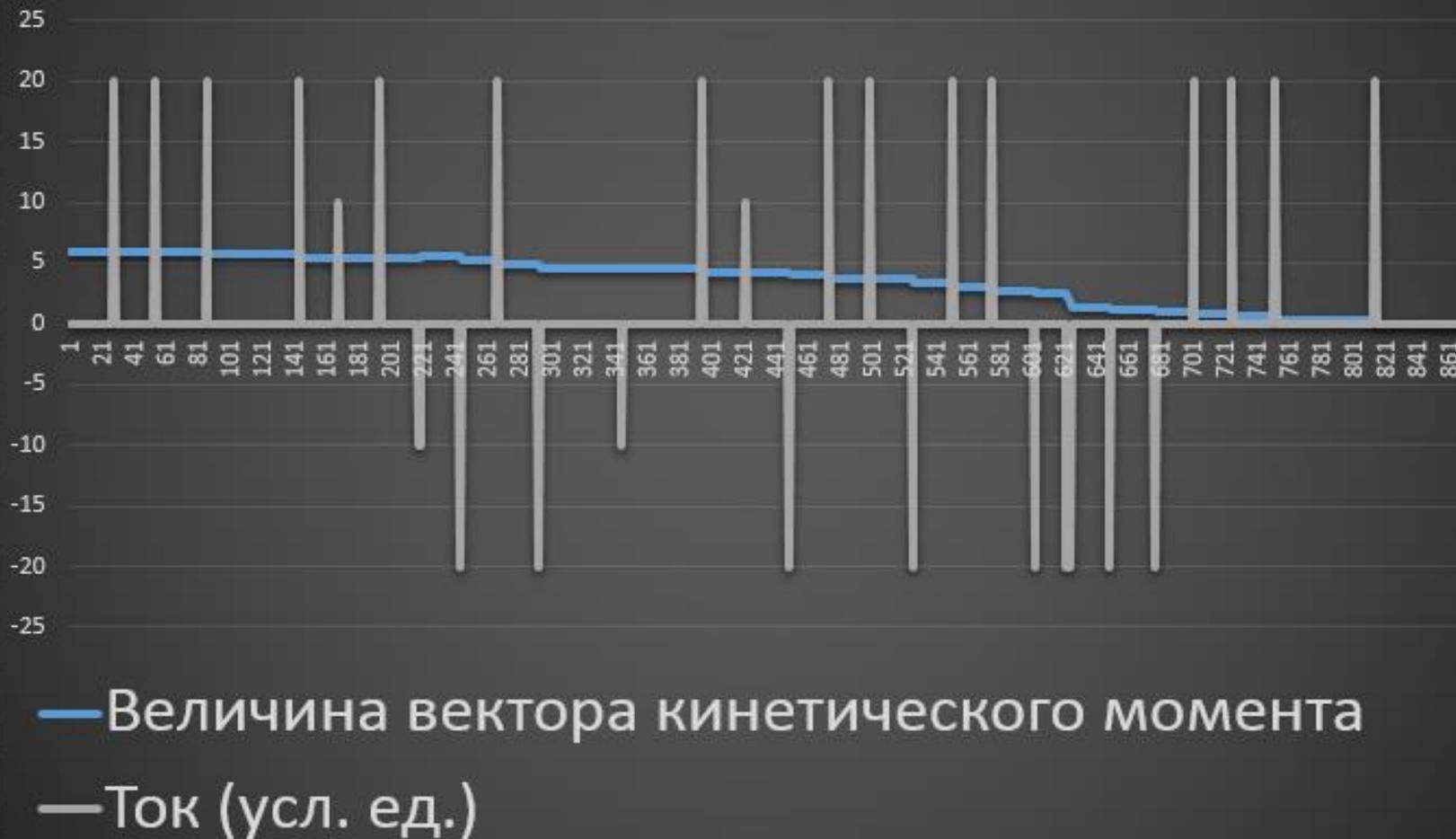
```
void Start()
{
    rb.AddTorque(transform.up * fx, ForceMode.Impulse);
    rb.AddTorque(transform.right * fy, ForceMode.Impulse);
    if (!Directory.Exists("D:/MyUnitySettings"))
    {
        Directory.CreateDirectory("D:/MyUnitySettings");
    }

    if (!File.Exists("D:/MyUnitySettings/settings.ini"))
    {
        File.Create("D:/MyUnitySettings/settings.ini");
    }
    File.AppendAllText("D:/MyUnitySettings/settings.ini", "New" + Environment.NewLine);
}
```

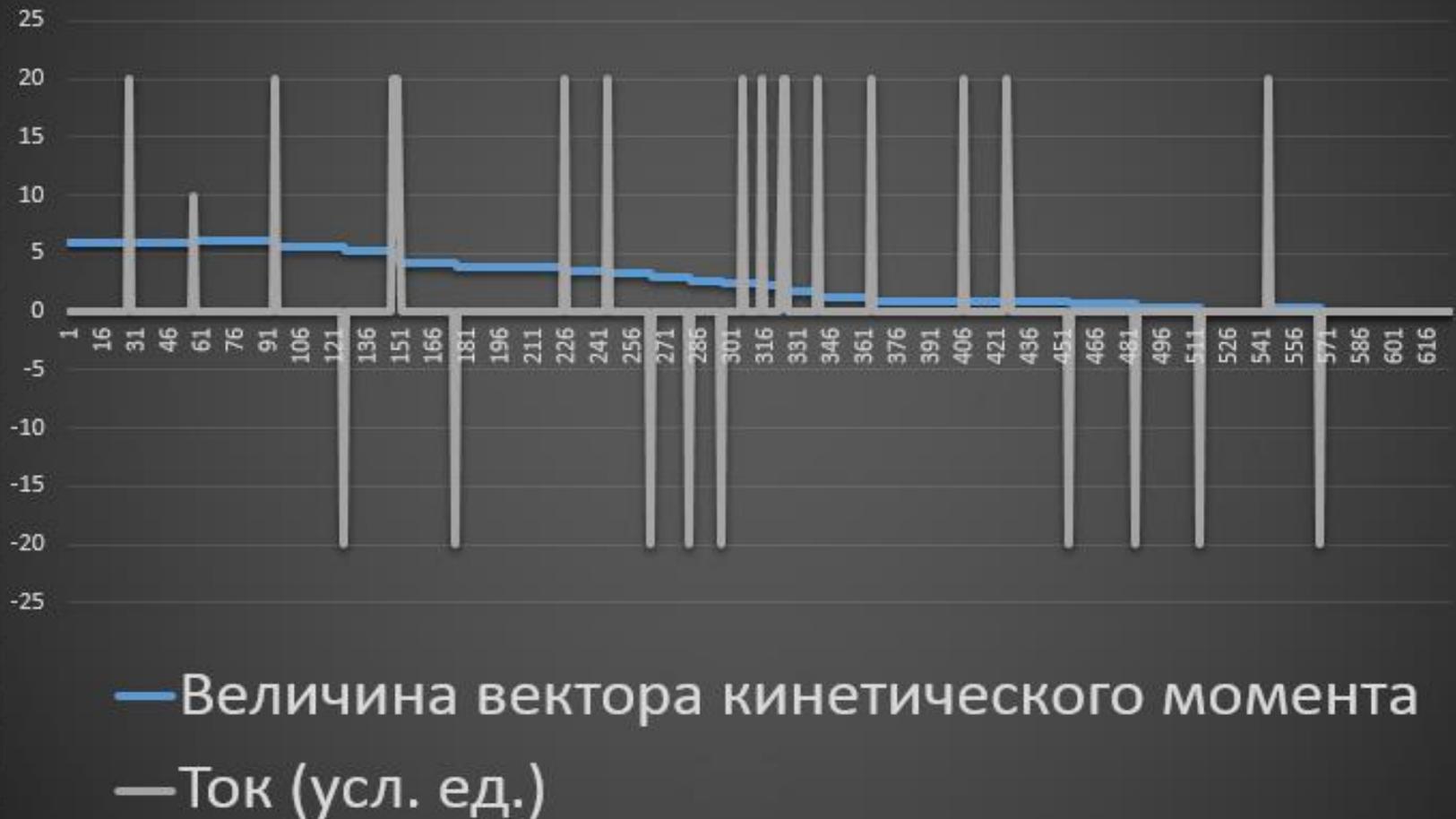
```
void FixedUpdate()
{
    if (Input.GetKeyDown("space")) {
        s = torque * Time.deltaTime;
    };
    int fingerCount = 0;
    foreach (Touch touch in Input.touches)
    {
        if (touch.phase != TouchPhase.Ended && touch.phase != TouchPhase.Canceled)
        {
            fingerCount++;
            a = touch.position.x / Screen.width;
            b = touch.position.y / Screen.height;
            if (b > 0.5) v = torque * Time.deltaTime;
            if (b < 0.5) v = -torque * Time.deltaTime;
        }
    }
}
```

```
v1 = Vector3.Cross(transform.up, Vector3.left) * ds*s;  
    File.AppendAllText("D:/MyUnitySettings/settings.ini", omega.magnitude.ToString("#.00000"));  
    File.AppendAllText("D:/MyUnitySettings/settings.ini", "," + (ds*s).ToString("#.00000") + Environment.NewLine);  
rb.AddTorque(v1);  
s = 0;
```

Стабилизация спутника



Стабилизация спутника



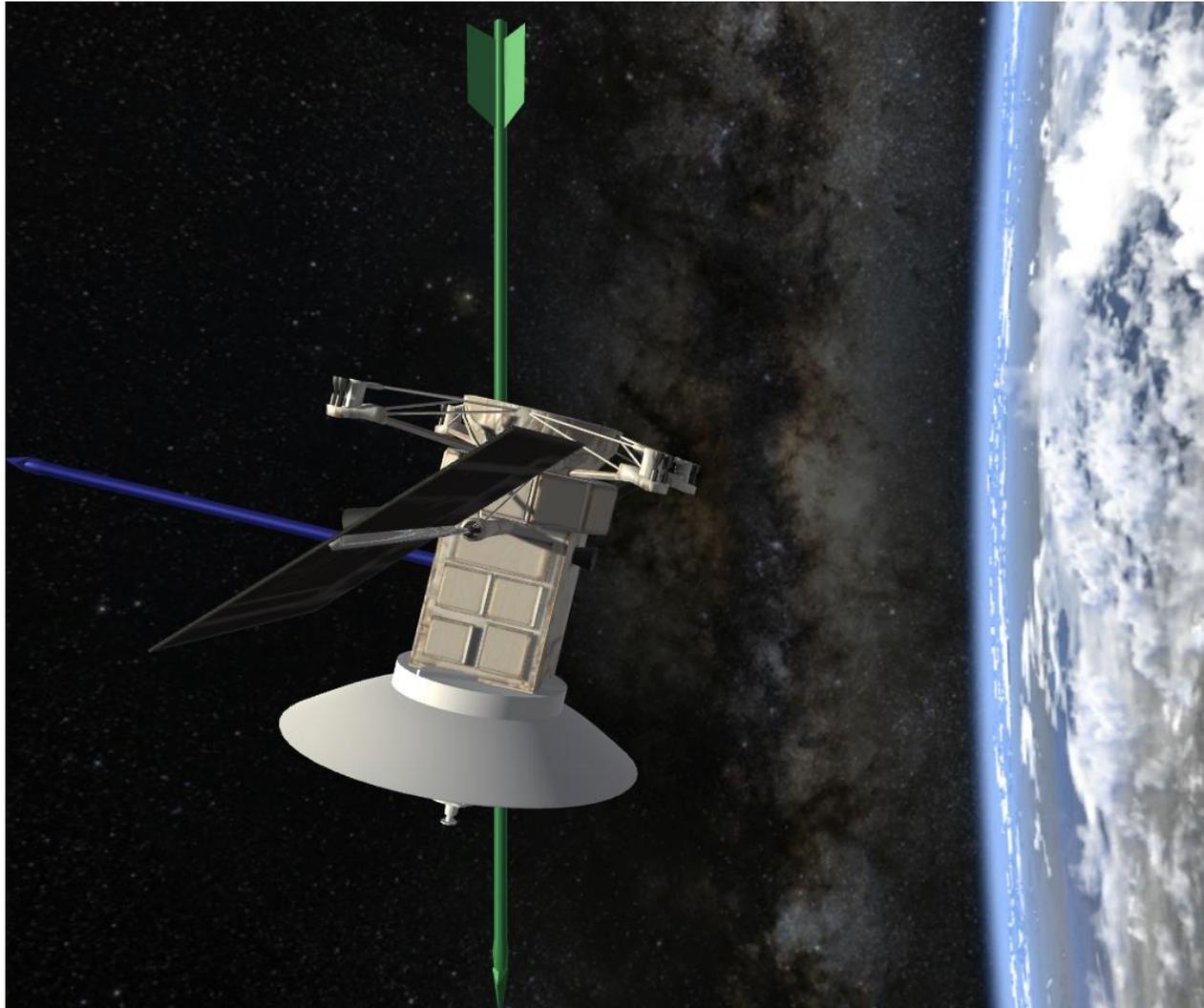
2D возмущения



3D возмущения





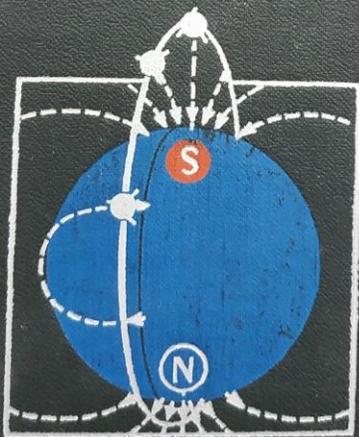


Помимо сильного предположения о кратковременном воздействии алгоритм содержит также очевидные недостатки

1. Все три варианта могут никак не влиять на энергию. Такой случай возникает, когда катушка параллельна вектору магнитного поля Земли.
2. Если сила тока задана, то энергия в некоторых случаях не уменьшаться во всех трех случаях. Например, когда вращение, вызванное магнитным моментом, в разы превосходит то вращение, которое требуется снизить. Но есть и менее очевидные случаи.

А. П. КОВАЛЕНКО

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
КОСМИЧЕСКИМИ
ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ
АППАРАТАМИ



Оставляя пока в стороне вопрос о возможных законах управления, отметим основные особенности управления в МПЗ, вытекающие из выражений (1.1) и (1.2).

Первая особенность, как это следует со всей очевидностью из формулы (1.1), заключается в том, что вектор управляющего момента \mathbf{M} перпендикулярен вектору \mathbf{B} и поэтому нельзя создать управляющий момент в направлении поля; все возможные положения \mathbf{M} заключены в плоскости, нормальной \mathbf{B} .

Вторая особенность, иллюстрируемая выражением (1.2), состоит в том, что управление по осям оказывается зависимым (управляющие магнитные моменты действуют не только в «своем» — одноименном — канале управления, но и в других каналах). Независимое управление может быть обеспечено лишь относительно двух осей. Например, при известных в данный момент проекциях поля B_x, B_y, B_z для получения требуемого управляющего момента M_x в канале x необходимо установить определенные L_y и L_z . Тогда требуемый управляющий момент в канале y может быть достигнут лишь соответствующим подбором L_x , при этом управляющий момент канала z окажется уже установленным в зависимости от ранее выбранных L_x и L_y .

Хотя отмеченные особенности и ограничивают в некоторой степени применение магнитных систем управления по сравне-

В тоже время алгоритм обладает некоторыми преимуществами и возможностями для устранения недостатков:

1. алгоритм прост и интуитивно понятен,
2. если есть возможность использования двух катушек, то очевидно, что параллельности суммарного (векторная сумма) магнитного момента магнитному полю Земли можно избежать,
3. уменьшая продолжительность тока, можно почти неограниченно уменьшать величину магнитного момента

Литература

1. White J.S., Shigemoto F.H., Bourquin K. **Satellite attitude control utilizing the Earth's magnetic field** // Technical note D-1068. Ames Research Center. National aeronautics and space administration. Washington. August. **1961**
2. Dougherty H., Tompetrini K., Levinthal J., Nurre G. **Space telescope pointing control system** // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 5, No. 4. **1982**, pp. 403-409.
3. Beals G. A., Crum R. C., Dougherty H. J., Hegel D. K., Kelley J.L. **Hubble Space Telescope precision pointing control system** // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 11, No. 2. **1988**, pp. 119-123.
4. Ovchinnikov M.Yu., Ivanov D.S. **Overview of Attitude Control Systems for Cubesats**, Proceedings of the 1st IAA Conference on University Satellites Mission and Cubesat Workshop, IAA Book Series – **2012**, V.2, №1, pp.503-514.
5. Ролдугин Д.С. **Исследование быстродействия и точности алгоритмов активной магнитной системы ориентации малого спутника**: дис. ... кфмн: 01.02.01 / Ролдугин Дмитрий Сергеевич; [Место защиты: Институт прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН].- Москва, **2013** - 129 стр.
6. Ivanov D., Ovchinnikov M., Penkov V., Roldugin D., Doronin D., Ovchinnikov A. **Advanced numerical study of the three-axis magnetic attitude control and determination with uncertainties** // Acta Astronautica – **2017**. – V.132. – P. 103-110
7. Описание продукта **Magnetorquer “SatBus MTQ”** на сайте производителя. URL: <https://navionics.com/subsystems/cubesat-magnetorquer-satbus-mtq/>
8. Предварительный макет демонстрационного стенда. URL: <http://mtas.ru/satweb/index.html>

Спасибо за внимание!

