

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ “ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ
П.Н. ЛЕБЕДЕВА” РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

ЛАБОРАТОРИЯ БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

**Описание входных и выходных
параметров программно-вычислительного
комплекса “SOAP: Spacecraft Orbit and
Attitude Prediction tool”**

Запевалин П.Р.

Фраерман А.В.

Москва 2025

Оглавление

1	Выходные файлы	3
1.1	Файл эфемерид	3
1.2	Файл телеметрии	3
2	Описание входных параметров	5
2.1	Общая структура входного JSON файла	5
2.2	Simulation	6
2.2.1	interval	7
2.2.2	step	7
2.2.3	start_time	7
2.2.4	output_step	7
2.2.5	orbit_file	7
2.3	Spacecraft	7
2.3.1	state_vector	8
2.3.2	mass	8
2.3.3	quaternion	8
2.3.4	angular_velocity	8
2.3.5	inertia_tensor	8
2.4	Geometry	8
2.4.1	polygons	8
2.4.2	solar_panels	9
2.4.3	vtk_file	9
2.4.4	vtk_koeffs	9
2.5	Control systems	10
2.5.1	gyrostats VS reaction wheels	10
2.5.2	gyrostats	10
2.5.3	reaction_wheels	10

2.5.4	magnetorquers	11
2.5.5	pulse_engines	11
2.5.6	control_order	11
2.6	Attitude modes	11
2.6.1	stop_motion	12
2.6.2	scan_motion	12
2.7	Forces	12
2.8	Filenames	13
3	Пример входного JSON файла	14

Глава 1

Выходные файлы

1.1 Файл эфемерид

В файле эфемерид представлена информация о

1. моменте времени — данные идут с выходным шагом(2.2.4)
2. векторе положения в геоцентрической небесной системе координат GCRF (км)
3. векторе скорости в геоцентрической небесной системе координат GCRF (км/с)
4. кватернионе ориентации — кватернион преобразования координат локальной системы координат (жёстко связанной с аппаратом) к осям GCRF в формате (w, x, y, z)

1.2 Файл телеметрии

В файле телеметрии представлена информация о

1. моменте времени — совпадает с шагом интегрирования
2. моменте сил, действующих на аппарат в локальной системе координат ($H * m$)
3. моменте систем управления, в зависимости от того, установлены ли они на космическом аппарате

- а) маховиков (reaction wheels) — момент импульса каждого маховика в отдельности и 3 компоненты суммарного момента

ИЛИ (см. 2.5.1)

- б) маховиков (gyrostats) — момент импульса каждого маховика;
- в) магнитных исполнительных органов — компоненты магнитного момента

4. момент силы двигателей стабилизации

5. угловой момент космического аппарата

Глава 2

Описание входных параметров

В этой главе приводится полный список входных и выходных параметров, а также приводится пример полного входного файла.

2.1 Общая структура входного JSON файла

В общем виде JSON файл имеет следующую структуру:

```
"имя блока 1": {  
  "параметр 1": значение,  
  "параметр 2": [значение 1, значение 2],  
  "параметр 3": [  
    {  
      "элемент 1": значение,  
      "элемент 2": значение  
    },  
    {  
      "элемент 1": другое значение,  
      "элемент 2": другое значение  
    }  
  ]  
},
```

```
"имя блока 2" : {
    ...
}
```

JSON может содержать следующие блоки:

- `simulation(2.2)` – содержит основные параметры численного интегрирования
- `spacescraft(2.3)` – минимально необходимые параметры космического аппарата
- `geometry(2.4)` – поверхность космического аппарата, разбитая на полигоны, солнечные панели
- `control_systems(2.5)` – системы управления ориентацией, установленные на борту, их количество и параметры
- `attitude_modes(2.6)` – режимы поддерживаемой ориентации (постоянной, сканирующей)
- `forces(2.7)` – переключатели используемых сил и моментов сил
- `filenames(2.8)` – пути к используемым файлам, в том числе сохраняемому файлу эфемерид и телеметрии

Все названия блоков задаются с маленькой буквы в том формате, в котором они перечислены в этом списке.

Порядок блоков, а также параметров внутри каждого из них, является логичным с точки зрения автора, но не является обязательным — программа корректно прочитает файл независимо от порядка расположения структурных блоков.

В следующих главах рассмотрен каждый блок в отдельности с полным описанием параметров и их типов. Пример входного файла со всеми параметрами приведён в главе 3.

2.2 Simulation

В блоке *simulation* обязательно должны присутствовать параметры: `interval`, `step`, `start_time`. К необязательным относятся: `output_step`, `orbit_file`.

2.2.1 interval

Промежуток, на который ведётся интегрирование, дробное число секунд.

2.2.2 step

Шаг интегрирования, дробное число секунд. Для выбора автоматического шага интегрирования необходимо задать параметр `step` отрицательным, либо равным нулю.

2.2.3 start_time

Начальная эпоха, задаётся в формате YYYY-MM-DDTHH:MM:SS.S. Вместо разделителя T может использоваться любой символ.

2.2.4 output_step

Шаг вывода данным в файл эфемерид, дробное число секунд. По умолчанию равен шагу интегрирования при постоянном шаге и интервалу при автоматическом.

2.2.5 orbit_file

Путь к файлу орбиты. При задании этого параметра вычисление орбиты производиться не будет, а будут браться значения из указанного файла. По умолчанию файл орбиты отсутствует.

2.3 Spacecraft

В блоке *spacecraft* обязательно должны быть указаны параметры: `state_vector`. К необязательным относятся параметры `mass`, `quaternion`, `angular_velocity`, `inertia_tensor`.

2.3.1 state_vector

Вектор состояния космического аппарата в инерциальной системе координат (км и км/с), 6 дробных чисел

2.3.2 mass

Масса космического аппарата в кг, одно дробное число. По умолчанию 10 кг.

2.3.3 quaternion

Кватернион ориентации в формате w x y z, 4 дробных числа. По умолчанию (1, 0, 0, 0), то есть совпадение осей локальной и небесной систем координат.

2.3.4 angular_velocity

Начальная угловая скорость аппарата в рад/с, 3 дробных числа. По умолчанию равна нулю.

2.3.5 inertia_tensor

Тензор инерции космического аппарата без учёта инерционной системы ориентации (маховиков) в кг*м² в собственных осях. Вектор из 3 дробных чисел (диагональные элементы тензора инерции). По умолчанию (10, 10, 10).

2.4 Geometry

В блоке *geometry* могут быть заданы параметры *polygons*, *solar_panels*, *vtk_file*, *vtk_koeffs*.

2.4.1 polygons

Указывается количество *count* полигонов и список параметров *parameters*. Описание каждого полигона должно содержать его век-

тор положения (*position*), единичный вектор внешней нормали (*normal*), площадь (*area*), коэффициенты отражения (*albedo*) и зеркальности (*specularity*).

Эти полигоны не включают в себя солнечные панели.

2.4.2 `solar_panels`

Описание солнечных панелей совпадает с описанием полигонов, но также имеет дополнительный параметр *rai* — Rotation Axis Index. Предполагается, что относительно одной из главных осей космического аппарата солнечная панель может совершать вращение, подставляя Солнцу наибольшую площадь. Параметр *rai* может принимать значения 0 для оси *Ox*, 1 для оси *Oy*, 2 для оси *Oz* и -1, если солнечная панель не может вращаться.

2.4.3 `vtk_file`

Если есть файл с описанием поверхностей космического аппарата в формате VTK Polygons, то вместо описания полигонов достаточно указать путь к этому файлу.

2.4.4 `vtk_koeffs`

Если указан *vtk*-файл с полигонами, то для задания их коэффициентов отражения и зеркальности можно указать путь к соответствующему файлу. Этот файл имеет текстовый формат и должен содержать 2 колонки дробных чисел — коэффициентов отражения и зеркальности (в таком порядке).

Если в этом файле *N* строк и меньше, чем число полигонов *P*, то для последних *P-N* полигонов коэффициент отражения устанавливается 0.54, коэффициент зеркальности 1.0.

Если файл коэффициентов не указан, то значения 0.54 и 1.0 устанавливаются для всех полигонов.

2.5 Control systems

В блоке *control_systems* указываются системы управления ориентацией: *gyrostats*, *reaction_wheels*, *magnetorquers*, *pulse_engines*, а также параметр *control_order*.

2.5.1 gyrostats VS reaction wheels

На русский язык оба термина можно перевести как “маховики”, однако, по историческим причинам, в программе они существуют отдельно. Более того, они являются взаимоисключающими — на космическом аппарате могут быть установлены либо *gyrostats*, либо *reaction wheels*. Это логично в том плане, что на конкретном аппарате устанавливается какая-то одна система маховиков.

Отличие между этими системами следующее: маховики *gyrostats* установлены так, что вращаются независимо вдоль главных осей космического аппарата, поэтому их количество должно быть кратно 3. Маховики *reaction wheels* установлены пирамидкой из 4-х маховиков, поэтому их вращение не независимо, и их количество должно быть кратно 4.

2.5.2 gyrostats

Задаётся количество *count* маховиков (должно быть кратно 3) и список параметров *parameters* каждого маховика. Для каждого маховика указывается вектор положения (м) *location*, главные моменты инерции ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$) *inertia*, пределы угловой скорости (рад/с) *limits* — три дробных числа, при этом ненулевым должна оказаться только одна компонента предела (первая, если ось ориентирована по оси X, вторая, если по Y, третья, если по Z).

2.5.3 reaction_wheels

Задаётся количество *count* маховиков (должно быть кратно 4) и список параметров *parameters* каждого блока маховиков. Указываются вектор положения (м) *location*, главные моменты инерции ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$) *inertia*, начальная скорость каждого из 4х маховиков *initial_speed*,

углы *angles* в порядке α, β , направление оси блока *pyramid_apex* — X, Y или Z.

2.5.4 magnetorquers

Это магнитные исполнительные элементы, для них также указывается количество *count* и список параметров *parameters*. В качестве параметров выступают текущее значение силы тока (А) *current*, максимальное значение магнитного момента *max_dipole* — это вектор с одной ненулевой компонентой, масса (кг) *mass*.

2.5.5 pulse_engines

Задаётся количество *count* двигателей и список их параметров *parameters*. В качестве параметров для каждого двигателя указываются: вектор положения *position*, максимальный импульс — это вектор с одной ненулевой компонентой, соответствующей направлению выброса газа, начальная масса *mass*.

2.5.6 control_order

Приоритет, в котором используются системы управления ориентацией. *r* — reaction wheels, *g* — gyrostats, *m* — magnetorquers, *θ* — engines. Указываются первые два приоритета. Третьим приоритетом всегда будут стоять двигатели. Фактически используется, чтобы обозначить приоритет между МИО и маховиками той или иной конструкции.

2.6 Attitude modes

В блоке *attitude_modes* описываются режимы сканирующей (scan) и постоянной (stop) ориентации. Промежутки постоянной и сканирующей ориентации не должны пересекаться более, чем в одной точке. Все промежутки, которые не являются сканирующей или постоянной ориентациями являются режимами свободной ориентации.

2.6.1 stop_motion

Задаётся количество режимов постоянной ориентации *count* и список их параметров *parameters*. В качестве параметров передаются начальная эпоха *start_time* в формате YYYY-MM-DDTHH:MM:SS.S, конечная эпоха *stop_time* в том же формате и кватернион поддерживаемой ориентации *quaternion* в формате w x y z.

Конечная эпоха может превышать конечную эпоху интегрирования, в этом случае поддержание ориентации будет происходить до конца интегрирования.

2.6.2 scan_motion

Задаётся количество режимов сканирующей ориентации *count* и список их параметров *parameters*. В качестве параметров передаются начальная эпоха *start_time* в формате YYYY-MM-DDTHH:MM:SS.S, конечная эпоха *stop_time* в том же формате и вектор угловой скорости *velocity* рад/с.

2.7 Forces

В блоке *forces* содержатся указания на модель сил и моментов сил, используемых в моделировании. Каждый из параметров может принимать значение *true*, если эта модель используется, и *false*, если не используется.

- *gravity_force* — гравитационное притяжение Земли
- *gravity_order* — порядок разложения гравитационного потенциала, натуральное число. Если 0, то используется центральное поле
- *outer_gravity* — притяжение Солнца, Луны и планет солнечной системы
- *solar_pressure_force* — сила солнечного давления
- *gravity_torque* — момент сил, создаваемый гравитационным притяжением Земли

- `solar_pressure_force` — момент сил солнечного давления
- `magnetic_torque` — момент сил взаимодействия с магнитным полем Земли

2.8 Filenames

В блоке *filenames* воздержатся имена используемых и создаваемых файлов. Создаваемые файлы указываются по параметру *output*, *save_path* для файла эфемерид и *telemetry_path* для файла телеметрии.

Входные файлы указываются по параметру *input* под следующими именами:

- `egm_path` — файл коэффициентов модели гравитационного потенциала Земли
- `eop_path` — файл параметров вращения Земли
- `tls_path` — файл, содержащий leap seconds
- `eph_path` — файл эфемерид
- `igrf_path` — файл коэффициентов модели магнитного поля Земли
- `gm_path` — файл гравитационных параметров Солнца, Луны и планет солнечной системы

Глава 3

Пример входного JSON файла

В этой главе приведён пример входного файла, в котором использованы все возможные параметры. Этот файл не может служить файлом входных параметров, потому что одновременно использованы системы управления ориентацией *gyrostats* и *reaction_wheels*.

Также стоит отметить, что при используемом файле орбиты *orbit_file* бесполезно учитывать те или иные силы, орбита всё равно будет браться из файла, а не из расчётов.

Полигоны, перечисленные через использование параметра *polygons* вымещают те, которые указаны в файле *vtk_file*.

Два последних замечания не вызовут ошибки с точки зрения запуска и работы программы, но явно могут привести к неожиданному результату работы.

```
{
  "simulation": {
    "start_time": "2016-05-31T00:00:00.0",
    "interval": 10000,
    "step": 1.0,
    "output_step": 1.0,
    "orbit_file": "/media/alexey/Disk/asc/orbit.txt"
  },
  "spacecraft": {
    "state_vector": [5957.4, 0.0, 3439.5, 0.0, 7.6, 0.0],
```

```

    "quaternion": [0.19378, 0.033945, 0.010695, 0.9804],
    "angular_velocity": [0.0, 0.0, 0.0],
    "inertia_tensor": [
        [27.0, 0.0, 0.0],
        [0.0, 200.0, 0.0],
        [0.0, 0.0, 200.0]
    ],
    "mass": 100.0
},
"geometry": {
    "polygons": {
        "count": 2,
        "parameters": [
            {
                "position": [0.75, 0.0, 0.0],
                "normal": [1.0, 0.0, 0.0],
                "area": 1.6,
                "albedo": 0.5,
                "specularity": 0.5
            },
            {
                "position": [-0.75, 0.0, 0.0],
                "normal": [-1.0, 0.0, 0.0],
                "area": 1.6,
                "albedo": 0.5,
                "specularity": 0.5
            }
        ]
    }
},
"solar_panels": {
    "count": 2,
    "parameters": [
        {
            "position": [-1.25, 0.0, 0.0],
            "normal": [0.0, 1.0, 0.0],
            "area": 0.8,
            "albedo": 0.5,

```



```

        "specularity": 0.5,
        "rai": 0
    },
    {
        "position": [0.0, 1.25, 0.0],
        "normal": [0.0, 0.0, 1.0],
        "area": 0.8,
        "albedo": 0.5,
        "specularity": 0.5,
        "rai": 1
    }
]
},
"vtk_file": "/media/alexey/Disk/asc/polygons.vtk"
},
"control_systems": {
    "gyrostats": {
        "count": 3,
        "parameters": [
            {
                "location": [0.0, 0.0, 0.0],
                "angular_velocity": 0.0,
                "mass": 5.0,
                "inertia": [0.02388, 0.001, 0.001],
                "limits": [628.0, 0.0, 0.0]
            },
            {
                "location": [0.0, 0.0, 0.0],
                "angular_velocity": 0.0,
                "mass": 5.0,
                "inertia": [0.001, 0.02388, 0.001],
                "limits": [0.0, 628.0, 0.0]
            },
            {
                "location": [0.0, 0.0, 0.0],
                "angular_velocity": 0.0,
                "mass": 5.0,

```

```

        "inertia": [0.001, 0.001, 0.02388],
        "limits": [0.0, 0.0, 628.0]
    }
]
},
"reaction_wheels": {
    "count": 8,
    "parameters": [
        {
            "location": [1.0, 0.0, 0.0],
            "angles": [30, -90],
            "inertia": [0.001, 0.001, 0.01],
            "mass": 5.0,
            "initial_speed": [0.0, 0.0, 0.0, 0.0],
            "speed_limit": 628.0,
            "pyramid_apex": Y
        },
        {
            "location": [1.0, 0.0, 0.0],
            "angles": [-30, -90],
            "inertia": [0.001, 0.001, 0.01],
            "mass": 5.0,
            "initial_speed": [0.0, 0.0, 0.0, 0.0],
            "speed_limit": 628.0,
            "pyramid_apex": "Y"
        }
    ]
},
"magnetorquers":{
    "count": 2,
    "parameters": [
        {
            "max_dipole": [10.0, 0.0, 0.0],
            "mass": 0.3,
            "current": 0.1
        },
        {

```

```

        "max_dipole": [0.0, 0.0, 10.0],
        "mass": 0.3,
        "current": 0.1
    }
]
},
"pulse_engines": {
    "count": 6,
    "parameters": [
        {
            "position": [0.75, 0.75, 0.0],
            "limits": [0.0, 200000.0, 0.0],
            "mass": 10.0
        },
        {
            "position": [0.75, 0.0, 0.75],
            "limits": [0.0, 0.0, 200000.0],
            "mass": 10.0
        },
        {
            "position": [0.0, 0.75, 0.75],
            "limits": [0.0, 0.0, 200000.0],
            "mass": 10.0
        },
        {
            "position": [-0.75, -0.75, 0.0],
            "limits": [0.0, 200000.0, 0.0],
            "mass": 10.0
        },
        {
            "position": [-0.75, 0.0, -0.75],
            "limits": [0.0, 0.0, 200000.0],
            "mass": 10.0
        },
        {
            "position": [0.0, -0.75, -0.75],
            "limits": [0.0, 0.0, 200000.0],

```

```

        "mass": 10.0
    }
]
},
"control_order": {
    "first": "r",
    "second": "m"
}
},
"attitude_modes": {
    "stop_motion": {
        "count": 2,
        "parameters": [
            {
                "quaternion": [0.19378, 0.033945, 0.010695, 0.9804],
                "start_time": "2016-05-31T00:00:00.0",
                "stop_time": "2017-05-31T13:48:00.0"
            },
            {
                "quaternion": [1.0, 0.0, 0.0, 0.0],
                "start_time": "2017-05-31T13:48:30.0",
                "stop_time": "2018-05-31T13:48:00.0"
            }
        ]
    },
    "scan_motion": {
        "count": 2,
        "parameters": [
            {
                "velocity": [1.0, 0.0, 0.0],
                "start_time": "2019-05-31T00:00:00.0",
                "stop_time": "2020-05-31T00:00:00.0"
            },
            {
                "velocity": [0.0, 2.0, 0.0],
                "start_time": "2020-05-31T00:00:00.0",
                "stop_time": "2021-05-31T00:00:00.0"
            }
        ]
    }
}

```

```

        }
    ]
}
},
"forces": {
    "gravity_force": true,
    "gravity_order": 36,
    "outer_gravity": true,
    "solar_pressure_force": true,
    "gravity_torque": true,
    "solar_pressure_torque": true,
    "magnetic_torque": true
},
"filenames": {
    "output": {
        "save_path": "./output/ephemeris.txt",
        "telemetry_path": "./telemetry/telemetry.txt"
    },
    "input": {
        "egm_path": "/media/alexey/Disk/asc/Files/EGM2008.dat",
        "eop_path": "/media/alexey/Disk/asc/Files/eop_new.txt",
        "tls_path": "/media/alexey/Disk/asc/Files/naif0012.tls",
        "eph_path": "/media/alexey/Disk/asc/Files/de440.bsp",
        "gm_path": "/media/alexey/Disk/asc/Files/gm_de440.tpc",
        "igrf_path": "/media/alexey/Disk/asc/Files/igrf.dat"
    }
}
}
}

```