

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ИНТЕГРАЛ» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ГРУППИРОВОК И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Н. А. Завьялова✉, **С. С. Негодяев**, **А. А. Кузнецов**, **И. Н. Завьялов**,
И. И. Фукин, **В. Ю. Семака**, **П. А. Гришин**

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация*

Целью работы являлось создание программного комплекса для моделирования решения целевых задач многоспутниковыми группировками. Комплекс состоит из модулей динамики центра масс космического аппарата, расчета дистанционного зондирования Земли, спутниковой связи (включая маршрутизацию передачи сообщений по межспутниковой связи), мониторинга космического пространства и других. Основной особенностью реализации была математическая и вычислительная оптимизация расчетов, что позволило проводить их на обычном компьютере без привлечения дополнительных вычислительных мощностей. В ходе работы были предложены поправки к методу Эверхарта для коррекции шага интегрирования траектории. Параллельная реализация также помогла существенно ускорить вычисления. Для иллюстрации работы приведены примеры решения двух различных задач: расчета оптимальной орбиты для задачи мониторинга космического пространства и решения задачи определения минимального числа космических аппаратов, необходимого для зондирования границы Российской Федерации раз в полчаса. Особенностью комплекса является работа с группировкой как с целостным объектом на уровне постановки задач и последующая аналитика ее решения, которая представляется в виде информации по целевым задачам, подгруппам группировки, космическим аппаратам и всей группировке.

Ключевые слова: многоспутниковая группировка, космический аппарат, математическое моделирование, наукоемкий комплекс программ, дистанционное зондирование, космическая связь, мониторинг космического пространства.

Введение

В настоящий момент в мире неуклонно растет количество космических аппаратов (КА) и космических объектов в околоземном пространстве. Российский каталог содержит несколько десятков таких объектов, а каталог активных космических аппаратов Североамериканского командования воздушно-космической обороны (North American Aerospace Defense Command – NORAD) [1] насчитывала 5844 объекта на 01.06.2022.

Многоспутниковая группировка является сложным для проектирования и эксплуатации техническим объектом. Поэтому на этапах проектирования, разработки, эксплуатации и утилизации таких объектов необходимы специализированные наукоемкие программные комплексы. Предполагается, что такие комплексы включают

в себя линейки математических моделей, базы данных компонент, алгоритмы бортового программного обеспечения и блок методов анализа для оценки полученных результатов.

1. Краткое описание программного комплекса «Интеграл»

Такой подход используется в демонстраторе программного комплекса «Интеграл». Комплекс выполнен в виде клиент-серверного приложения, где архитектура вычислительного сервера реализована на языке Python 3, а клиент реализован в виде веб-интерфейса. Расчетные модули реализованы на языке C++ для сокращения времени расчетов. Серверная архитектура модульная и позволяет заменять отдельные вычислительные модули при условии соответствия программных интерфейсов. На сервере также располагаются базы данных выполненных проектов, компонент КА, траекторий, целевых задач и показателей эффек-

✉ Zavialova.na@mipt.ru

твности. Также возможна интеграция готовых решений (предполагается, что в этом случае они обладают лицензией MIT [2]). Программный комплекс представлен на рис. 1.



Рис. 1. Схема программного комплекса «Интеграл»

Наборы реализованных модулей условно можно разделить на 6 категорий по назначению:

1. Орбитальная динамика, включает численные методы интегрирования траекторий (Эверхаргт [3], Дорманд-Принс [4], Кутта-Фелберг [5], Рунге-Кутта 4-го порядка [6]), модели среды (атмосфера, эфемериды тел Солнечной системы, давление солнечного излучения, геопотенциал и его изменение и влияние тени), а также полуаналитическую модель SGP4 [7; 8].

2. Мониторинг космического пространства, поддерживающий учет программы наблюдений, а также оптический и радиолокационный диапазон, в котором работают наблюдатели.

3. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в радиолокационном и оптическом диапазонах с учетом программ наблюдений (или автоматическим их выбором), а также определением показателей качества системы.

4. Космическую связь с расчетом сеансов связи, параметров каналов связи с учетом межспутниковой передачи данных и маршрутизации сообщений на сетях, устойчивых к разрывам [9].

5. Конструктор космического аппарата – модуль, позволяющий, используя информацию о компонентах из базы данных и перечень требований к КА, подобрать конфигурации КА, наиболее подходящие, например, по массе.

6. Имитационный эксперимент – модуль, помогающий имитировать выполнение полетных заданий, моделировать работу подсистем, проверять корректность работы бортовых алгоритмов и, соответственно, выдавать технические требования к КА.

Основной особенностью программного комплекса является оптимизация алгоритмов и невы-

сокие требования к вычислительным мощностям. В качестве иллюстрации приведем несколько примеров скорости работы вычислительных модулей.

Для модуля баллистики была предложена модификация выбора шага интегрирования в методе Эверхарта на основе собственного метода оценки погрешности, которая основывалась, в свою очередь, на фундаментальных свойствах квадратур Гаусса. Также был предложен метод параллельных вычислений траекторий КА, разделивший данные для каждого аппарата от общих данных: влияния третьих тел, гравитационного поля Земли, вращения Земли и др. Для процессов, связанных с гравитационным полем, была разработана собственная быстрая модель [10; 11].

В табл. 1 приведены времена расчетов для низких околоземных орбит (НОО), геостационарных орбит (ГСО) и высокоэллиптических орбит (типа Молния) для разной продолжительности полета и 2-х моделей гравитационного поля – на 16 и 64 гармоники. Для каждого типа орбит сначала идет столбец для одного КА, далее указывается число КА и число потоков, обчислываемых параллельно. Из результатов видно, что расчет полета на 1 месяц для менее чем 100 КА занимает до 10 секунд.

В табл. 2 решалась задача мониторинга техногенных объектов в околоземном космическом пространстве оптическими средствами наблюдения, расположенными на орбите и на земной поверхности за 1 сутки измерений. Для этого рассчитывались траектории всех объектов, условия их освещенности, видимые звездные величины и регистрация их наземными и космическими средствами наблюдения.

Таблица 1

Характерные времена расчета для моделирования околоземного полета группы КА

Гармоники	Время полета	НОО			ГСО			Молния		
		1 КА	8(8)	100(14)	1 КА	8(8)	100(14)	1 КА	8(8)	100(14)
16	1 сут.	0,73	0,17	0,41	0,05	0,02	0,07	0,35	0,17	0,24
	30 сут.	21,13	3,52	10,12	1,36	0,5	0,94	10,5	4,22	6,78
	365 сут.	254	49,98	111,03	16,49	4,3	11,68	128,24	44,45	80,75
64	1 сут.	0,86	0,24	1,95	0,05	0,03	0,24	0,41	0,16	1,18
	30 сут.	25,47	7,24	57,72	1,51	0,62	5,15	11,8	4,75	34,19
	365 сут.	297,18	76	596,54	18,28	7,55	58,66	142,11	55,05	422,06

Таблица 2

Характерные времена расчета для задачи мониторинга околоземного космического пространства за одни сутки

Количество целей	Количество КА	Количество наземных телескопов	Время, затрачиваемое на расчет, с
5845	1	0	17,6219
11690	1	0	37,4804
5845	0	1	8,43131
11690	0	1	16,7891
5845	0	10	17,7821
11690	0	10	35,5984
5845	10	0	141,07
11690	10	0	312,584
5845	10	10	150,542
11690	10	10	338,736

В табл. 3 приведены характерные времена для расчетов решения задачи ДЗЗ одним КА в оптическом диапазоне для разных по площади

регионов. Из таблицы видно, что, например, зондирование территории Российской Федерации занимает в течение одного месяца не более 2 секунд.

Таблица 3

Характерные времена расчета (в секундах) для задачи ДЗЗ одним КА за одни сутки

Область	1 день	7 дней	30 дней	360 дней
Украина	0,003	0,021838	0,090423	1,07609
Россия	0,47214	0,361954	1,56123	18,3851
Земной шар	0,55659	4,14132	17,7667	189,935

Далее рассмотрим примеры решения конкретных задач.

2. Пример решения задачи мониторинга космического пространства

Задача мониторинга околоземного космического пространства заключается в определении оптимальной орбиты для космического аппара-

та – наблюдателя за космическими объектами техногенного происхождения в околоземном космическом пространстве на высотах до 40 000 км.

Для расчетов формировалась группировка космических объектов. За основу была взята выборка из активных КА базы данных NORAD, состоящая из 5844 объекта (на 1 июля 2022 года). Моделировались одни сутки полета (как показали дальнейшие расчеты, при увеличении продолжительности моделирования результат не меняется).

Объекты представлялись диффузно-рассеивающими сферами, отражающими солнечное излучение по закону Ламберта.

Определялся один показатель эффективности – средняя потенциальная обзорность, который вычислялся следующим образом. Для каждой цели с номером j определялись интервалы, когда цель находится в поле зрения наблюдателя, эти интервалы суммировались и делились на общее время моделирования:

$$\Omega_j = \frac{\sum_i \tau_{ij}}{T},$$

где $\sum_i \tau_{ij}$ – сумма всех отрезков времени, когда объект попадал в потенциальную область видимости наблюдателя; T – время моделирования (в нашем случае 1 сутки). Потенциальная обзорность фактически соответствует доли времени, которое объект наблюдается на указанном интервале времени.

Потенциальная обзорность рассчитывалась с учетом неограниченного поля зрения наблюдателя, но с учетом отражения целью света и необходимости отстройки от Солнца, Луны и Земли.

Средняя потенциальная обзорность рассчитывалась как усредненное значение по всем целям. Для N целей это:

$$\Omega = \frac{\sum_i \Omega_i}{N}.$$

Далее в расчетах варьировались следующие параметры:

высота	400–2000 км, шаг 25 км
наклонение	0°–180° с шагом 3°
долгота восходящего узла (ДВУ)	0°–360° с шагом 3°

Всего было проведено 479 765 расчетов, результатом каждого расчета было одно число – потенциальная обзорность.

Для наглядности строились тепловые карты для каждой высоты квазикруговой орбиты аппарата-наблюдателя в координатах наклонение–долгота восходящего узла. На рис. 2 представлена такая тепловая карта для высоты 400 км.

400

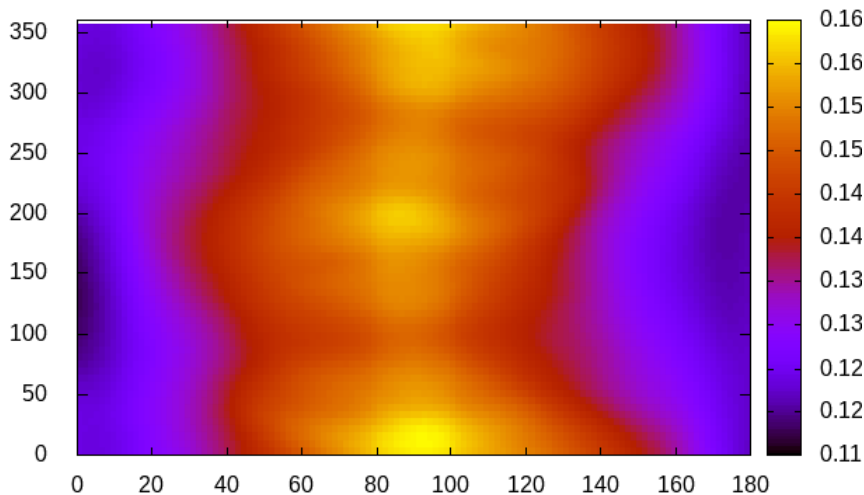


Рис. 2. Средняя обзорность орбит целей

Для каждой высоты выбиралось наилучшее значение средней обзорности и далее по этим наилучшим значениям сравнивались вы-

соты орбит. В табл. 4 приведены наилучшие показатели в зависимости от высоты, наклонения и ДВУ.

Таблица 4

Лучшие значения средней обзорности для разных высот и соответствующие наклонение и долгота восходящего узла

Высота	Наклонение	ДВУ	Средняя обзорность
1050	84,00	180,00	0,21208
1100	84,00	180,00	0,21205
1075	84,00	180,00	0,21181
1125	81,00	180,00	0,21170
1025	84,00	180,00	0,21154

Окончание табл. 4

1000	84,00	180,00	0,21129
975	84,00	183,00	0,21100
1150	81,00	180,00	0,21097
950	96,00	3,00	0,21077
925	96,00	9,00	0,21039
1175	81,00	180,00	0,21008

166

В результате расчетов было установлено, что наилучшие обзорности лежат в середине рассматриваемого интервала моделирования и находятся на высотах 925–1175 км. При уменьшении или увеличении высоты обзорность уменьшается.

Позже этот результат был подтвержден сравнением с другим показателем качества – ко-

личеством ненаблюдаемых объектов, полученным с помощью многовариантных расчетов при тех же начальных данных. Так, например, на рис. 3 приведены профили, полученные наложением всех возможных результатов для двух показателей эффективности – средняя обзорность и количество ненаблюдаемых целей для рассматриваемого диапазона высот.

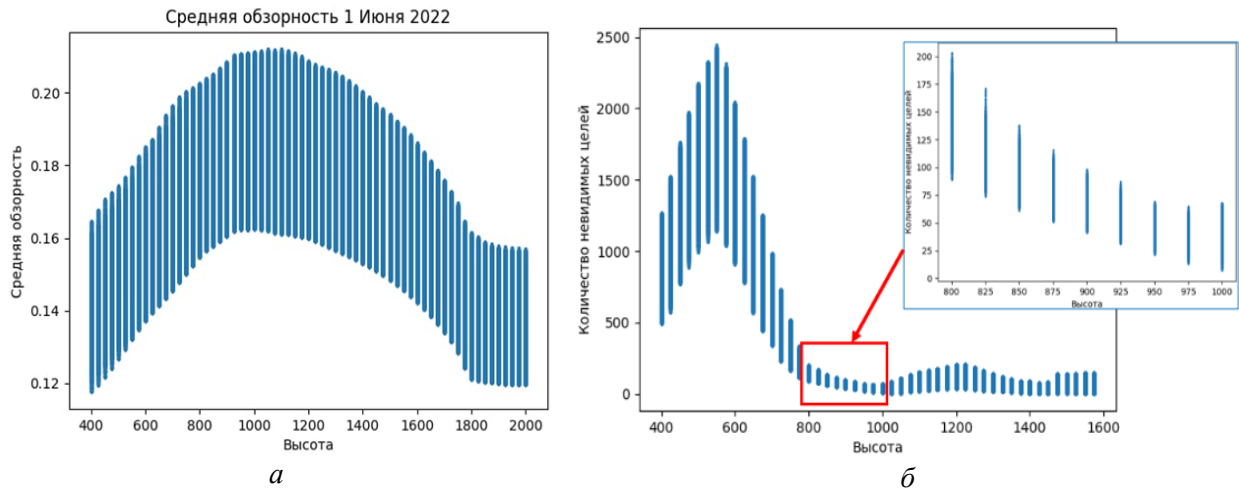


Рис. 3. (а) – средняя потенциальная обзорность для наклонений и ДВУ в зависимости от высот, (б) – число ненаблюдаемых КА для всех наклонений и ДВУ в зависимости от высот

3. Пример решения задачи дистанционного зондирования Земли в оптическом диапазоне

Рассмотрим другую задачу: определить минимальное число КА и баллистические построения для зондирования границы РФ группировкой перспективных КА. Считается, что такой КА может производить съемку при наличии относительной угловой скорости снимаемой поверхности до 2°/сек.

Параметры перспективного КА ДЗЗ в зачетных условиях наблюдения:

- высота орбиты – 400 км, орбита – круговая;
- полоса захвата – 10 км;
- предельный угол крена – 20°;
- предельный угол тангажа – 10°;
- максимальная угловая скорость – 2°/сек;
- линейное разрешение – 0,7 м (в надири);
- масса полезной нагрузки – 120 кг.

Было проведено 112 расчетов для различных баллистических построений КА, находящихся на квазикруговых солнечно-синхронных орбитах. В расчетах определялся основной показатель эффективности – средняя периодичность наблюдения по всем точкам – и средняя периодичность наблюдения каждой точки, которая определялась следующим образом. Для каждой точки границы с номером j определялись интервалы времени, когда эта точка наблюдается, и пропуски между интервалами наблюдения:

$$\omega_j = \max_i \Delta t_{ij},$$

где Δt_{ij} – интервалы не наблюдения точки с номером j .

Далее по всем точкам считается средняя обзорность. Для N точек она выглядит так:

$$\omega = \frac{\sum_j \omega_j}{N}.$$

Так же, помимо вычислений орбитальной динамики и полос захвата, решались задачи управления КА и перераспределения задач зондирования между КА.

По результатам, представленным на рис. 4, можно определить то количество КА, которое нужно для просмотра границы с нужной средней периодичностью. И так же определить какое количество КА нужно, чтобы достичь требуемой периодичности наблюдений.

Также можно установить периодичность наблюдения точек границы РФ. Для группировки, состоящей из 153 КА (17 плоскостей по 9 аппаратов), она представлена на рис. 5. Как и везде в подобных задачах периодичность на севере области немного

лучше, чем на юге. Однако, есть некоторые южные точки, для которых значение периодичности значительно хуже, чем в среднем по зондируемому региону. Такая ситуация систематически наблюдается в расчетах, поэтому для выполнения целевых показателей работы группировки было выбрано некоторое пороговое количество точек. Если показатель для них достигался, то считалось, что он выполнен в целом по региону. Указанное пороговое значение может задаваться пользователем произвольно, но в расчетах ниже оно было равно 99 %.

Кроме периодичности можно посчитать за какое время регион оказывается полностью покрыт наблюдением. Результаты для группировки из 153 КА представлены на рис. 6.

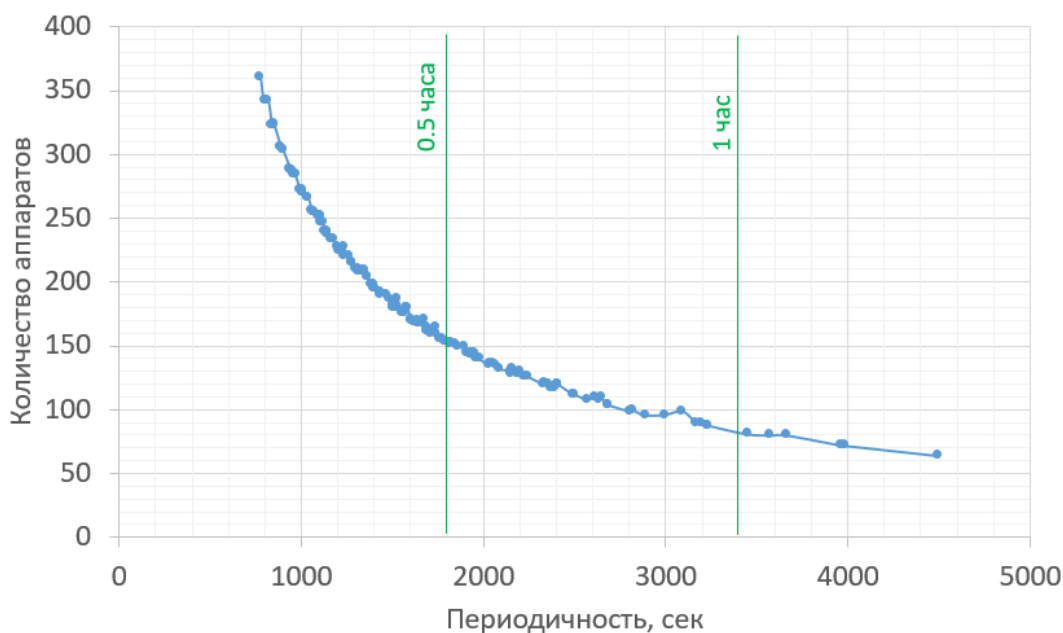


Рис. 4. Минимальное количество КА ДЗЗ, требуемое для достижения нужной периодичности зондирования границы РФ



Рис. 5. Периодичность наблюдения точек границы РФ группировкой из 153 космических аппаратов

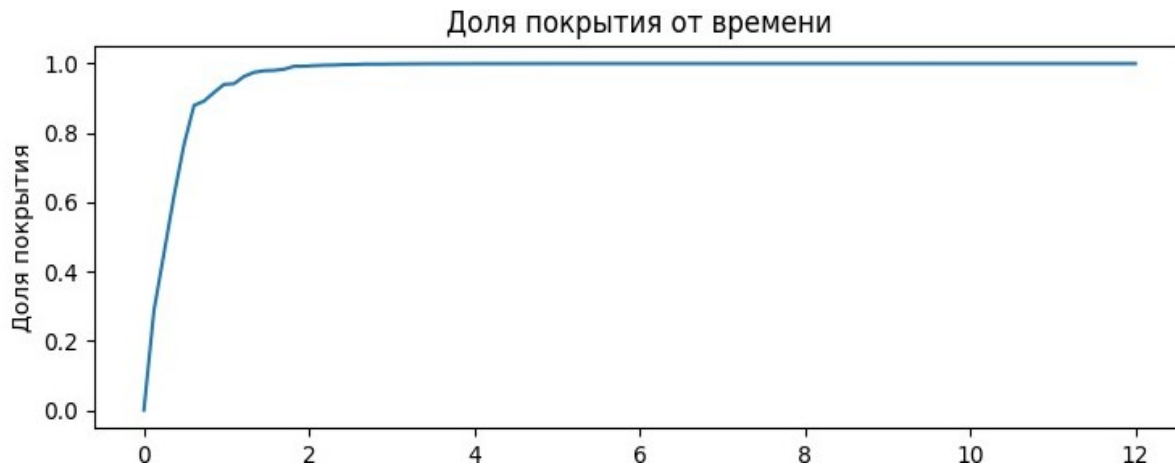


Рис. 6. Покрытие региона в зависимости от времени группировкой из 153 КА

Заключение

В заключение стоит отметить, что программный комплекс «Интеграл» предназначен для моделирования космических аппаратов и группировок космических аппаратов и позволяет решать следующие задачи (выходящие за рамки настоящей статьи): динамика центра масс КА, ДЗЗ из космоса, космическая связь, мониторинг космического пространства, конструктор КА, имитационный эксперимент.

Основное вычислительное ядро комплекса оптимизировано и позволяет быстро проводить расчеты, например:

- динамика 100 КА на 30 суток (на 14 ядрах) – за 10 секунд;
- съемка 5845 объектов 10-ю оптическими телескопами – за 17,7 секунд;
- оптическая съемка территории РФ в течение месяца – за 1,56 секунды.

Благодарности

Работа поддержана Фондом перспективных исследований в рамках проекта «Создание демонстратора комплекса программного обеспечения для проектирования многоспутниковых космических систем», шифр «Интеграл-Д».

Список литературы

- [1] Каталог NORAD [Электронный ресурс]. URL: <http://celestrak.org/NORAD/elements/> (дата обращения: 06.03.2023).
- [2] Various Licenses and Comments about Them [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gnu.org/licenses/license-list.en.html> (дата обращения: 06.03.2023).
- [3] Авдюшев В. А. Интегратор Гаусса–Эверхарта // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15. № 4. С. 31–46.
- [4] Aristoff J. M., Horwood J. T., Poore A. B. Orbit and uncertainty propagation: a comparison of Gauss–Legendre-, Dormand–Prince-, and Chebyshev–Picard-based approaches // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 2014. vol. 118. pp. 13–28. doi: 10.1007/s10569-013-9522-7.
- [5] Фельберг Э. Классические формулы Рунге-Кутты низкого порядка с контролем размера шага и их применение к некоторым задачам теплопередачи. Технический отчет НАСА. 1969, 315 с.
- [6] Аристова Е. Н., Завьялова Н. А., Лобанов А. И. Практические занятия по вычислительной математике. Ч. 1. М.: МФТИ. 2014.
- [7] Lane M. The development of an artificial satellite theory using a power-law atmospheric density representation // 2nd Aerospace Sciences Meeting. 1965. P. 35.
- [8] Cranford K. An improved analytical drag theory for the artificial satellite problem // Astrodynamics Conference. 1969. P. 925. doi: 10.2514/6.1969-925.
- [9] Jain S., Fall K., Patra R. Routing in a delay tolerant network // Proceedings of the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. 2004. pp. 145–158.
- [10] Kuznetsov A. A., Fukin I. I., Bazov S. M., Zavialova N. A. Using an Interpolation Model of the Gravitational Potential for High-Precision Ballistic Calculations // Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering. 2022. pp. 239–247. doi: 10.1007/978-981-16-8154-7_19.
- [11] Zavialova N. A., Pliashkov E. V., Kuznetsov A. A., Semaka V. Y., Panov V. A., Zavialov I. N., Fukin I. I., Negodiaev S. S. Methods for accurate ballistics calculations for multi-satellite constellations // Advances in the Astronautical Sciences. 2020. pp. 91–98.

SOFTWARE PACKAGE «INTEGRAL» FOR MODELING SPACE CONSTELLATIONS AND SPACE VEHICLES

N. A. Zavialova, S. S. Negodyaev, A. A. Kuznetsov, I. N. Zavialov,

I. I. Fukin, V. Yu. Semaka, P. A. Grishin

Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation

The aim of the work was to create a software package for modeling the solution of target problems by multi-satellite constellations. The software consists of modules for the dynamics of the center of mass of the satellites, remote sensing of the Earth, satellite communications (including routing of messages over inter-satellite communications), space monitoring and others. The main feature of the implementation was the mathematical and computational optimization of calculations, which made it possible to carry them out on a conventional computer without involving additional computational power. In the course of the work, corrections to the Everhart method were proposed to improve the trajectory integration step. Parallel implementation also helped to significantly speed up the calculations. To illustrate the work, examples of solving two different problems are given: calculating the optimal orbit for the task of monitoring outer space and solving the problem of determining the minimum number of satellites needed to scan the border of the Russian Federation once every half an hour. A feature of the soft is the work with the constellation as an integral object at the level of setting tasks and the subsequent analytics of its solution, which is presented in the form of information on target tasks, subgroups of the constellation, spacecraft and the entire constellation.

Keywords: multi-satellite constellations, spacecraft, mathematical modeling, science-intensive software package, remote sensing, space communication, space monitoring.

References

- [1] Catalog NORAD. Available at: <http://celestrak.org/NORAD/elements/> (accessed 06.03.2023).
- [2] Various Licenses and Comments about Them. Available at: <https://www.gnu.org/licenses/license-list.en.html> (accessed 06.03.2023).
- [3] Avdyushev V. A. Gauss–Everhart Integrator // Computational technologies, 2010, vol. 15, no. 4, pp. 31–46.
- [4] Aristoff J. M., Horwood J. T., Poore A. B. Orbit and uncertainty propagation: a comparison of Gauss–Legendre-, Dormand–Prince-, and Chebyshev–Picard-based approaches // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2014, vol. 118, pp. 13–28. doi: 10.1007/s10569-013-9522-7.
- [5] Felberg E. Classical low-order Runge-Kutta formulas with step size control and their application to some heat transfer problems. NASA technical report, 1969, 315 p.
- [6] Aristova E. N., Zavyalova N. A., Lobanov A. I. *Prakticheskie zanyatiya po vychislitel'noj matematike* [Practical exercises in computational mathematics]. Moscow, MIPT, 2014. (In Russian)
- [7] Lane M. The development of an artificial satellite theory using a power-law atmospheric density representation // 2nd Aerospace Sciences Meeting, 1965, P. 35.
- [8] Cranford K. An improved analytical drag theory for the artificial satellite problem // Astrodynamics Conference, 1969, P. 925. doi: 10.2514/6.1969-925.
- [9] Jain S., Fall K., Patra R. Routing in a delay tolerant network // Proceedings of the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, 2004, pp. 145–158.
- [10] Kuznetsov A. A., Fukin I. I., Bazov S. M., Zavialova N. A. Using an Interpolation Model of the Gravitational Potential for High-Precision Ballistic Calculations // Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering, 2022, pp. 239–247. doi: 10.1007/978-981-16-8154-7_19.
- [11] Zavialova N. A., Pliashkov E. V., Kuznetsov A. A., Semaka V. Y., Panov V. A., Zavialov I. N., Fukin I. I., Negodyaev S. S. Methods for accurate ballistics calculations for multi-satellite constellations // Advances in the Astronautical Sciences, 2020, pp. 91–98.

Сведения об авторах

Гришин Павел Алексеевич – аспирант, инженер лаборатории моделирования механических систем и процессов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Окончил

Московский физико-технический институт в 2022 году. Область научных интересов: системная архитектура информационных систем.

Завьялов Иван Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования механических систем и процессов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Окончил Московский физико-технический институт в 2007 году. Область научных интересов: механика сплошной среды и аэрокосмические технологии.

Завьялова Наталья Александровна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией моделирования механических систем и процессов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Окончила Московский физико-технический институт в 2008 году. Область научных интересов: математическое моделирование механики сложных систем и механики сплошной среды, создание наукоемких программных комплексов.

Кузнецов Александр Алексеевич – аспирант, инженер-программист лаборатории моделирования механических систем и процессов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Область научных интересов: вычислительные методы небесной механики, прогнозирование движения тел в околоземном пространстве.

Негодяев Сергей Серафимович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной механики Московского физико-технического института, директор Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Окончил Московский физико-технический институт в 1984 году. Область научных интересов: разработки в области создания малых космических аппаратов.

Семака Вадим Юрьевич – ведущий программист лаборатории исследований радиолокационных алгоритмов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Окончил Московский физико-технический институт в 2018 году. Область научных интересов: создание имитационных моделей.

Фукин Илья Игоревич – магистрант, инженер лаборатории моделирования механических систем и процессов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Область научных интересов: вычислительные методы небесной механики, прогнозирование движения тел в околоземном пространстве.