

## Планирование миссии космического аппарата дистанционного зондирования Земли на основе открытых исходных данных

© М.П. Заплетин<sup>1</sup>, А.Т. Жакыпов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия

<sup>2</sup>АО «НК «Казахстан Гарыш Сапары», Нур-Султан, 010000, Казахстан

*Представлена некоммерческая программа, разработанная в целях повышения эффективности исследований земной поверхности, которая предназначена для построения орбиты спутника дистанционного зондирования Земли, проведения оценки плана и возможностей съемки. Показано, что с помощью программы можно визуализировать орбиту любого доступного коммерческого космического аппарата дистанционного зондирования Земли в требуемый период времени, распланировать съемку территории определенным космическим аппаратом. Представлена вычислительная часть программы, созданная на основе модели SGP4, которая использует общедоступные данные TLE для спутников дистанционного зондирования Земли, формул сферической тригонометрии и эвристических методов сокращения вычислений. Программа реализована в виде веб-приложения на языках программирования JavaScript и PHP с применением библиотек Bootstrap, JQuery и Cesiumjs.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, планирование съемки, траектория движения спутника, веб-приложение

**Введение.** В настоящее время спутниковые методы играют ведущую роль в исследовании поверхности Земли. Это связано с дальнейшим совершенствованием космической и оптической техники, а также с развитием геоинформационных систем. Основными направлениями применения спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются составление карт, получение информации о состоянии окружающей среды и землепользования, изучение растительных сообществ, оценка урожая сельскохозяйственных культур и последствий стихийных бедствий. Средства ДЗЗ эффективны при изучении загрязнения почв и водоемов, льдов на суше и воде, в океанологии. Они позволяют получать сведения о состоянии атмосферы, в том числе в глобальном масштабе. При этом услуги ДЗЗ предоставляются огромным количеством разнообразных спутников, вращающихся по низким околоземным орбитам. В связи с этим перед пользователями услуг ДЗЗ возникает проблема выбора подходящего космического аппарата. В качестве критериев отбора здесь выступают, во-первых, оптические характеристики, во-вторых, оперативность и частота съемок. Если из множества всех доступных спутников ДЗЗ

условно выделить класс по схожести оптических характеристик, то для окончательного принятия решения требуется оценить, в какой мере сможет исполнить заказ на съемку тот или иной космический аппарат из этого класса. Для решения последней проблемы применяется программа, представленная в этой работе.

Цель настоящей работы — описание некоммерческого программного продукта, разработанного на основе открытого программного обеспечения и использующего общедоступные исходные данные, для планирования съемок космическим аппаратом ДЗЗ. Программа позволяет рассчитать орбиту любого доступного спутника ДЗЗ, оценить частоту его прохождения в окрестности интересующей территории и построить план съемок без высоких требований к вычислительным мощностям и с дружественным интерфейсом.

**Постановка задачи.** Описываемый программный продукт позволяет любому открытому космическому аппарату (КА) ДЗЗ решить следующие задачи:

- 1) построить траекторию движения на заданный интервал времени;
- 2) оценить частоту прохождения спутника в окрестностях интересующей территории;
- 3) получить широкие возможности для съемки намеченного участка поверхности Земли в указанный диапазон дат с учетом требований заказчика;
- 4) сформировать оптимальный по быстродействию план съемок запрашиваемой области на поверхности Земли.

При этом каждая из перечисленных задач является частью последующей задачи.

Следует отметить, что в интернете можно найти аналогичные программы, но они либо являются дорогими коммерческими продуктами с нетривиальным интерфейсом, либо имеют крайне ограниченный функционал. В качестве примера дорогого коммерческого продукта приведем SaVoir (<http://www.taitussoftware.com>), а среди бесплатных продуктов с открытым исходным кодом можно отметить WxTrack (<https://www.wxtrack.com>), который решает только первую из перечисленных выше задач. Описываемая программа покрывает достаточно широкий спектр задач, причем остается бесплатным программным продуктом с открытым исходным кодом.

**Обзор алгоритма решения.** Для решения первой из перечисленных задач служит модель SGP4 [1], которая использует TLE [2] в качестве начальных данных и определяет положение и скорость КА в заданный момент времени. Для построения орбиты спутника достаточно осуществить прогон модели SGP4 по указанному временному интервалу с определенным шагом.

Вторая и третья задачи объединяются в одну и являются продолжением первой, решение которой сводится к поиску моментов времени, когда территория интереса оказывается в области видимости спутника. Помимо этого, рассчитываются углы Солнца [3] на местности в момент прохождения над ней спутника в случае, если выставлены требования к минимальной освещенности.

Относительно четвертой задачи было введено допущение, что космический аппарат ДЗЗ может отснять только одну полосу за один пролет. С учетом этого к предыдущей, третьей, задаче планирование добавляет следующие этапы:

- покрытие минимальной выпуклой оболочки области интереса полосами съемки;
- такое распределение пролетов спутника между полосами, которое бы обеспечило съемку всей требуемой области за наименьшее время.

Вычислительная часть программы основана на алгоритмах решения поставленных выше задач и подзадач [4, 5], в которых используется модель SGP4, применяются формулы сферической тригонометрии [6] и эвристические методы сокращения вычислений.

**Программная реализация.** Сама программа реализована в виде веб-приложения. Написание кода программы осуществлялось с помощью языков программирования JavaScript [7] и PHP [8], языка разметки HTML вместе с CSS. В интерфейсе программы задействованы библиотеки JQuery [9] и Bootstrap [10]. Визуализация 3D-графики реализована с помощью библиотеки Cesium [11]. Веб-приложение развернуто на сервере Apache [12].

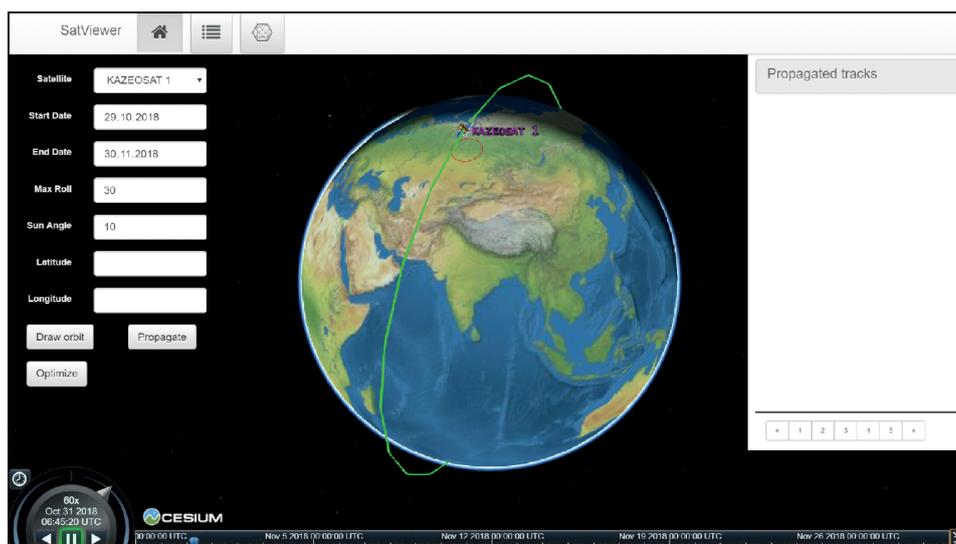


Рис. 1. Интерфейс программы

Интерфейс программы состоит из панелей ввода и вывода, основной подложки, представляющей собой трехмерную модель Земли и ползунка регулировки визуализации (рис. 1). На вход программы подаются следующие данные: название спутника, стартовая и конечная даты пролета, максимальный угол крена, минимальный угол Солнца, географические координаты области интереса. На панели ввода есть три кнопки, каждая из которых выполняет соответствующее действие: отрисовку орбиты, вывод пролетов, на которых возможно проведение съемки заданной территории, и планирование съемки. На панель вывода выдается список пролетов, подходящих для съемки. При выборе любого пролета из списка соответствующий участок траектории будет изображен на основной подложке так же, как и вся орбита спутника при нажатии на кнопку рисования орбиты (рис. 2). Кроме того, в приложении можно регулировать направление и скорость анимации.

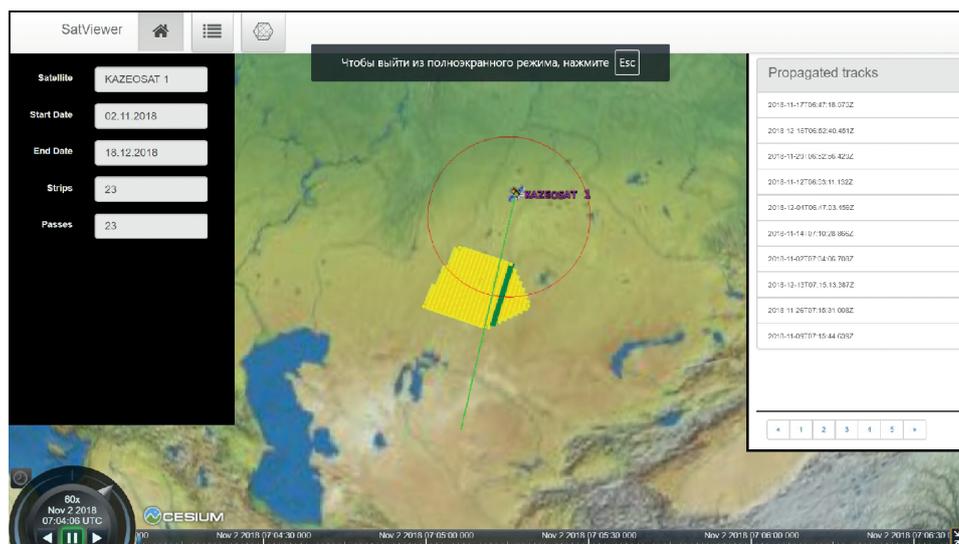


Рис. 2. Планирование съемки

Вычислительная часть программы обоснована описанными выше алгоритмами.

**Результаты численных экспериментов.** Приведем результаты работы программы в виде данных, полученных по тестам, проведенным на компьютере, со следующими характеристиками:

Процессор ..... Intel Core™ i7-4500U CPU @ 1.8 GHz 2.4GHz  
 Оперативная память, Гбайт ..... 8  
 Видеокарта ..... NVIDIA GeForce GT 750M, 2ГБ  
 Операционная система ..... Windows 10, 64 bit

Установлена зависимость времени счета от горизонта планирования при отрисовке орбиты космического аппарата ДЗЗ KazEOSat-1 (рис. 3).



Рис. 3. Зависимость времени счета от горизонта планирования

Получены результаты планирования съемки полигона (см. рис. 2) различными спутниками ДЗЗ (таблица). В качестве стартовой даты везде выбрано 01.11.2018, заданы максимальный угол крена —  $30^\circ$  и минимальная высота Солнца —  $10^\circ$ .

**Результаты планирования съемки различными космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли**

Спутник	Конечная дата	Количество полос	Количество пролетов	Время счета, мс
KazEOSat-1	18.12.2018	23	23	311
KazEOSat-2	05.12.2018	22	22	368
Landsat-7	22.12.2018	23	24	410
Sentinel-3A	23.12.2018	23	24	410
WorldView-4	01.01.2019	23	23	557
RapidEye-5	27.12.2018	23	23	337
Pleiades-1B	20.12.2018	23	23	398
Канопус-В № 1	16.12.2018	22	24	390
Yaogan-23	15.12.2018	23	24	476

Численные эксперименты, проведенные на среднестатистическом персональном компьютере, показали достаточно хорошие результаты и высокую скорость работы. Наибольшее время счета во всех тестах не превысило 600 мс. Полученные результаты демонстрируют возможность эффективного использования описанного в работе веб-приложения в интернете при относительно небольших затратах на аппаратуру.

**Заключение.** Программный продукт, созданный на основе открытого программного обеспечения с использованием общедоступных исходных данных для планирования съемок космическим аппаратом ДЗЗ, разработан в виде веб-приложения на базе популярных и открытых технологий. Графический интерфейс программы удобен для пользователя. Результаты проведенных численных экспериментов продемонстрировали эффективную работу веб-приложения в интернете без высоких требований к вычислительным мощностям. В итоге имеем некоммерческий программный продукт, решающий поставленные задачи с помощью общедоступных средств.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Vallado D., Crawford P., Hujsak R., Kelso T. Revisiting Spacetrack Report #3. *Collection of Technical Papers — AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference*, 2006. 3. no. 2006-6753, 88 p. DOI: 10.2514/6.2006-6753
- [2] NORAD Two-Line Element Sets Current Data. URL: <https://www.celestrak.com/NORAD/elements>
- [3] Meeus J. *Astronomical Algorithms*. 2nd Edition. Willmann Bell, Inc., Virginia, USA, 1999, 477 p. ISBN 978-0943396613
- [4] Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.T., Stein C. *Introduction to algorithms*. 3rd Edition. The MIT Press, Massachusetts, USA, 2009. ISBN 978-0262033848
- [5] Дубошин Г.Н. *Справочное руководство по небесной механике и астродинамике*. Москва, Наука, 1976, 864 с.
- [6] Van Brummelen G.R. *Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry*. Princeton University Press, NJ, USA, 2017. ISBN 978-0262033848
- [7] Вагнер Р., Вайк А. *JavaScript. Энциклопедия пользователя*. Москва, Diasoft, 2005, 464 с.
- [8] Welling L., Thomson L. *PHP and MySQL Web Development*. 5<sup>th</sup> Edition. Addison-Wesley Professional, USA, 2006. ISBN 978-03218333891
- [9] Freeman A. *Pro JQuery 2.0*. 2<sup>nd</sup> Edition. Apress, NY, USA, 2013. ISBN 978-1403263883
- [10] Bhaumik S. *Bootstrap Essentials*. Packt Publishing, UK, 2015. ISBN 978-1784395179
- [11] *Библиотека Cesium*. URL: <https://cesiumjs.org>
- [12] Mohammed J.K. *Apache Server 2 Bible*. Wiley, NY, USA, 2002. ISBN 978-0764548215

Статья поступила в редакцию 28.03.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Заплетин М.П., Жакыпов А.Т. Планирование миссии космического аппарата дистанционного зондирования Земли на основе открытых исходных данных. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 6.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-6-1892>

**Заплетин Максим Петрович** — доцент кафедры общих проблем управления механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Автор более 40 статей в области оптимального управления, механики космического полета, математического моделирования. e-mail: Zapletin\_m@mail.ru

**Жакышов Абылай Талгатулы** — ведущий инженер-начальник Группы АПО Управления КА СР ЦКС ДЗЗ «АО «НК «Казахстан Гарыш Сапары», г. Нур-Султан, Казахстан. Автор более 10 публикаций в области оптимального управления, математического моделирования и прикладных информационных технологий. e-mail: scipper92@mail.ru

## Planning the mission of an Earth remote sensing spacecraft based on open source data

© M.P. Zapletin<sup>1</sup>, A.T. Zhakypov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

<sup>2</sup>JSC “National Company “Kazakhstan Gharysh Sapary”,  
Nur-Sultan, 010000, Kazakhstan

*The paper introduces a non-profit program designed to improve the efficiency in the study of the Earth's surface. The program is designed to build the orbit of an Earth remote sensing satellite, to evaluate the plan and the possibilities of surveying a region of interest on the Earth's surface. Using this program, the user can visualize the orbit of any available commercial Earth remote sensing satellite in the required period of time, evaluate and plan a survey of the certain area by a specific spacecraft. The computational part of the program is based on the SGP4 model, which uses publicly available TLE data for Earth remote sensing satellites, on spherical trigonometry formulas and heuristic methods of computational shortcut. The program is implemented as a web application in the programming languages JavaScript and PHP using the Bootstrap, JQuery and Cesium libraries.*

**Keywords:** Earth remote sensing, survey planning, satellite motion trajectory, web-application

### REFERENCES

- [1] Vallado D., Crawford P., Hujsak R., Kelso T.S. Revisiting Spacetrack Report #3. *Collection of Technical Papers — AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference*, 2006. 3. 88 p. DOI: 10.2514/6.2006-6753
- [2] NORAD Two-Line Element Sets Current Data. Available at: <https://www.celestrak.com/NORAD/elements>
- [3] Meeus J. *Astronomical Algorithms*. 2<sup>nd</sup> ed. Willmann Bell, Inc., Virginia, USA, 1999, 477 p. ISBN 978-0943396613
- [4] Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.T., Stein C. *Introduction to algorithms*. 3<sup>rd</sup> ed. The MIT Press, Massachusetts, USA, 2009. ISBN 978-0262033848
- [5] Duboshin G.N. *Spravochnoe rukovodstvo po nebesnoy mehanike i astrodinamike* [Handbook of celestial mechanics and astrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 864 p.
- [6] Van Brummelen G.R. *Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry*. Princeton University Press, NJ, USA, 2017. ISBN 978-0262033848
- [7] Wagner R., Wyke A. *JavaScript Unleashed*. Sams, 3<sup>rd</sup> ed., 2000, 1024 p. [In Russ.: Wagner R., Wyke A. *JavaScript. Entsiklopediya polzovatelya*. Moscow, DiaSoft Publ., 2005, 464 p.].
- [8] Welling L., Thomson L. *PHP and MySQL Web Development*. 5<sup>th</sup> ed. Addison-Wesley Professional, USA, 2006. ISBN 978-03218333891
- [9] Freeman A. *Pro JQuery 2.0*. 2<sup>nd</sup> ed. Apress, NY, USA, 2013. ISBN 978-1403263883
- [10] Bhaumik S. *Bootstrap Essentials*. Packt Publishing, UK, 2015. ISBN 978-1784395179
- [11] *Biblioteka Cesium* [Cesium library]. Available at: <https://cesiumjs.org>
- [12] Mohammed J.K. *Apache Server 2 Bible*. Wiley, NY, USA, 2002. ISBN 978-0764548215

**Zapletin M.P.** (b. 1966), Assoc. Professor, Department of General Problems of Management of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University. Author of over 40 papers in the field of optimal control, space flight mechanics, mathematical modeling. e-mail: Zapletin\_m@mail.ru

**Zhakypov A.T.** (b. 1992) graduated from Lomonosov Moscow State University in 2015, lead engineer, Hardware and Software of GCC, ERS Space Systems Centre, JSC “National Company “Kazakhstan Gharysh Sapary”. Author of over 10 publications in the fields of optimal control, mathematical modeling and applied information technologies. e-mail: scipper92@mail.ru