Моделирование проекций орбит ИСЗ на поверхность Земли на Python с использованием модели SGP4 и API space-track.org

Определение положения ИСЗ по орбитальным данным на заданное время по модели SGP4. Автоматизированное получение орбитальных данных с помощью API сервиса space-track.org. Пример реализации на языке Python.

Обсудить в форуме
Комментариев — 2

Редактировать в вики

Задачу определения положения того или иного искусственного спутника Земли в заданный момент времени (в прошлом или недалёком будущем) приходится решать для самых разнообразных целей, в том числе связанных с дистанционным зондированием Земли из космоса. Часть данных (например, многие продукты MODIS) распространяется без строгой географической привязки, а лишь с указанием времени непосредственного наблюдения территории для каждой сцены, — и для автоматизации поиска и загрузки таких данных требуется вычислять время пролёта спутника над исследуемыми объектами. Часто возникает и потребность определить время зондирования заданной территории в будущем - чаще всего для проведения подспутниковых наблюдений (в целях верификации, атмосферной коррекции и пр.).

В статье описывается подход к моделированию проекций орбит ИСЗ на поверхность Земли с использованием доступных средств: библиотек языка Python и API сервиса space-track.org.

Содержание

Входные параметры модели SGP4

[править]

Наиболее распространенной моделью для определения положения спутников на орбите является SGP (Simplified General Perturbations), различные модификации которой используются в оперативной работе по всему миру начиная с 70-х годов. Главная задача модели - вычислить скорость и геоцентрические координаты ИСЗ (X, Y, Z) на заданный момент времени, которые нетрудно пересчитать на поверхность эллипсоида, получив географические координаты проекции положения ИСЗ (широта, долгота). Сама модель достаточно сложна, хотя и сводится к линейным расчётам и удобна для алгоритмизации. Её описание и оригинальный FORTRAN-код можно найти в соответствующих документах [1,2].

В качестве входных параметров SGP использует данные телеметрии спутников в формате TLE (two-line element sets): это две линии по 69 символов, описывающие основные метаданные спутника и параметры телеметрии [3]. Содержание первой линии:

Номер	Положение	Содержание	Пример
1	01-01	Номер строки	1
2	03-07	Номер спутника в базе данных NORAD	25994
3	08-08	Классификация (U=Unclassified — не секретный)	U
4	10-11	Международное обозначение (последние две цифры года запуска)	99
5	12-14	Международное обозначение (номер запуска в этом году)	068
6	15-17	Международное обозначение (часть запуска)	A
7	19-20	Год эпохи (последние две цифры)	16
8	21-32	Время эпохи (целая часть — номер дня в году, дробная — часть дня)	052.07623983
9	34-43	Первая производная от среднего движения (ускорение), деленная на два [виток/день^2]	.00001336
10	45-52	Вторая производная от среднего движения, деленная на шесть (подразумевается, что число начинается с десятичного разделителя) [виток/день^3]	00000-0
11	54-61	Коэффициент торможения B* (подразумевается, что число начинается с десятичного разделителя)	30635-3
12	63-63	Изначально — типы эфемерид, сейчас — всегда число 0	0
13	65-68	Номер (версия) элемента	999
14	69-69	Контрольная сумма по модулю 10	6

Собранный пример: 1 25994U 99068A 16052.07623983 .00001336 00000-0 30635-3 0 9996

Содержание второй линии:

Номер	Положение	Содержание	Пример
1	01-01	Номер строки	1

2	03-07	Номер спутника в базе данных NORAD	25994
3	09-16	Наклонение в градусах	98.1986
4	18-25	Долгота восходящего узла в градусах	128.0087
5	27-33	Эксцентриситет (подразумевается, что число начинается с десятичного разделителя)	0001485
6	35-42	Аргумент перицентра в градусах	109.3968
7	44-51	Средняя аномалия в градусах	250.7393
8	53-63	Частота обращения (оборотов в день) (среднее движение) [виток/день]	14.57136668
9	64-68	Номер витка на момент эпохи	86046
10	69-69	Контрольная сумма по модулю 10	2

Собранный пример: 2 25994 98.1986 128.0087 0001485 109.3968 250.7393 14.57136668860462

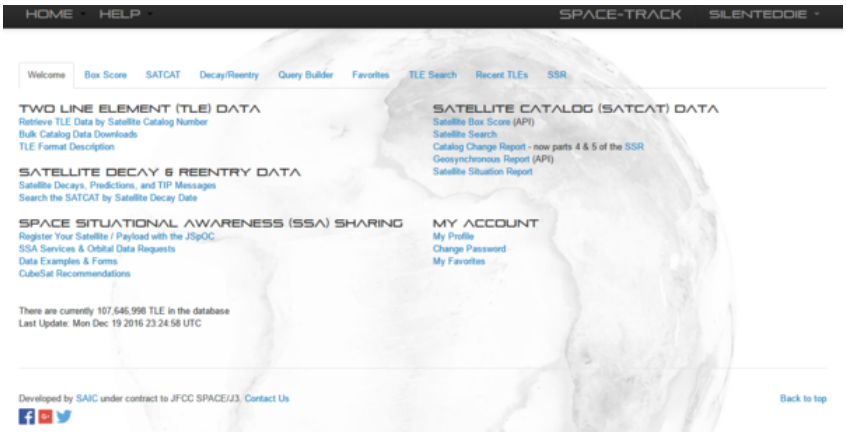
Важно понимать, что такие эфемериды описывают мгновенное состояние ИСЗ, и, хотя описывают его поведение с довольно высокой точностью, при увеличении дальности прогноза (относительно данной эпохи) будут давать всё большую и большую ошибку.

Получение данных TLE

[править]

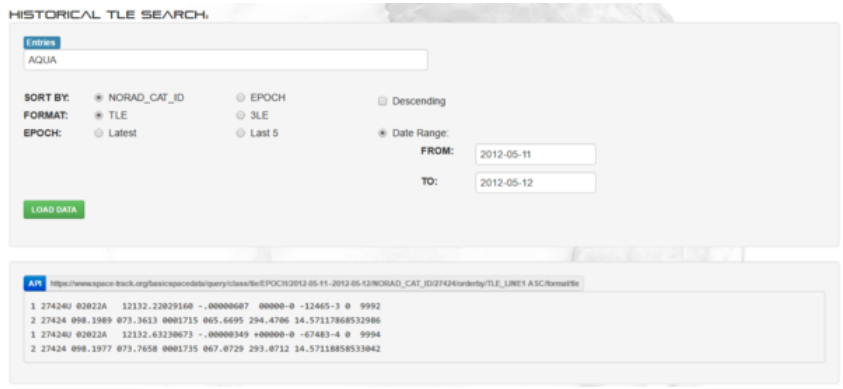
Данные TLE сегодня публикуются многими поставщиками (например, последние данные TLE по ряду спутников ДЗЗ на сайте ScanEx), но нам нужно получать не только свежие данные, но и архивные, для моделирования положений спутников в прошлом.

Одним из лучших в сети ресурсов представляется портал space-track.org, предоставляющий доступ к обширной информации о спутниках различного назначения. Очень важно, что space-track имеет REST API, позволяющее получать нужные данные максимально удобно. Требуется авторизация (и для доступа к интерфейсу, и для программного обращения к API), регистрация при этом бесплатная и открытая. Забегая вперёд, скажем в пользу space-track ещё то, что для работы с его API существует открытая python-библиотека.



Главная страница портала Space-Track.org

Непосредственно в интерфейсе сайта можно запрашивать данные TLE (в разделе Retrieve TLE Data by Satellite Catalog Number), заполнив небольшую форму с указанием названия или идентификатора спутника, а также интересующего вас периода времени. Для примера запросим данные TLE для спутника AQUA на середину мая 2012 года:

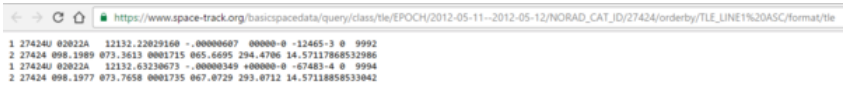


Запрос данных в интерфейсе сайта и ответ

Результат вы получаете мгновенно. Примечательно, что сразу же при выдаче ответа сервис выводит команду API, соответствующую вашему запросу - это позволяет очень быстро разобраться в том, как оно организовано и как с ним работать.

```
https://www.space-track.org/basicspacedata/query/class/tle/EPOCH/2012-05-11--2012-05-12/NORAD_CAT_ID/
```

Выполнив этот запрос тут же в адресной строке браузера (т.е. реализовав простой HTTP-запрос), можно увидеть, что при работе с API данные представляются в незамысловатом текстовом виде, в котором их, учитывая строгую структуру формата, несложно интерпретировать программно.

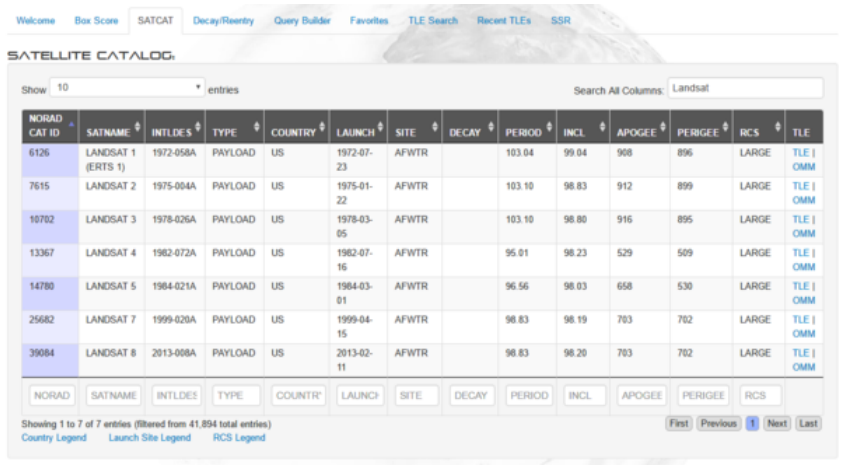


Запрос данных напрямую и ответ

В целом API подробно документировано . Для нашей задачи вполне достаточно рассмотреть тот пример, который был получен для майских приключений спутника AQUA. Изменяемыми в этой строке запроса будут всего два параметра:

- Диапазон дат (2012-05-11--2012-05-12), формат yyyy-mm-dd--yyyy-mm-dd;
- Идентификатор ИСЗ (27424).

Идентификатор нужного вам ИСЗ можно найти там же, на space-track, в разделе SATCAT , в удобном интерактивном интерфейсе. Нас интересует первая колонка таблицы результатов поиска. Например, поищем идентификаторы спутников программы Landsat:



Результаты поиска по ключевому слову Landsat

Landsat 8 соотвествует номеру 39084. Попробуем найти актуальные TLE для этого спутника, заодно посмотрев, как изменится структура запроса при использовании не диапазона дат, а опции "Latest", т.е. "последние данные". Запрос:

```
https://www.space-track.org/basicspacedata/query/class/tle_latest/ORDINAL/1/NORAD_CAT_ID/39084/orderb
```

и ответ:

```
1 39084U 13008A   16354.79369944  .00000065  00000-0  24444-4 0  9999
2 39084  98.2045  61.9547 0001318  94.3108 265.8241 14.57119154204938
```

Как видно, порядок аргументов в запросе изменился.

Программная реализация [править]

Открытая программная реализация модели SGP4 доступна для C++ и Python (библиотека pyorbital) . Для примера будем использовать именно Python и pyorbital (есть и другая реализация на Python'e: python-sgp4). Для получения данных от API space-track.org доступна специальная библиотека . Чтобы представить результат в формате геоданных применим библиотеку pyshp . Поскольку за нас уже почти всё сделали, код очень прост. Разберём его по разделам.

Установка необходимых библиотек [править]

Все библиотеки доступны в основном репозитории Python и устанавливаются очень просто

```
pip install pyorbital
pip install spacetrack
pip install pyshp
```

Получение данных space-track.org [править]

```
# Импортируем библиотеки
# Штатная библиотека для работы со временем
from datetime import datetime, date
# Собственно клиент для space-track
# Набор операторов для управления запросами. Отсюда нам понадобится время
import spacetrack.operators as op
# Главный класс для работы с space-track
from spacetrack import SpaceTrackClient

# Имя пользователя и пароль сейчас опишем как константы
USERNAME = <YOUR SPACE-TRACK USERNAME>
PASSWORD = <YOUR SPACE-TRACK PASSWORD>

# Для примера реализуем всё в виде одной простой функции
# На вход она потребует идентификатор спутника, диапазон дат, имя пользователя и пароль. Опциональный фла
```

```
def get_spacetrack_tle (sat_id, start_date, end_date, username, password, latest=False):
    # Реализуем экземпляр класса SpaceTrackClient, инициализируя его именем пользователя и паролем
    st = SpaceTrackClient(identity=username, password=password)
    # Выполнение запроса для диапазона дат:
    if not latest:
        # Определяем диапазон дат через оператор библиотеки
        daterange = op.inclusive_range(start_date, end_date)
        # Собственно выполняем запрос через st.tle
        data = st.tle(norad_cat_id=sat_id, orderby='epoch desc', limit=1, format='tle', epoch = daterange
    # Выполнение запроса для актуального состояния
    else:
        # Выполняем запрос через st.tle_latest
        data = st.tle_latest(norad_cat_id=sat_id, orderby='epoch desc', limit=1, format='tle')

    # Если данные недоступны
    if not data:
        return 0, 0

    # Иначе возвращаем две строки
    tle_1 = data[0:69]
    tle_2 = data[70:139]
    return tle_1, tle_2
```

Представлена очень простая функция, использующая клиентскую библиотеку space-track для получения одного (первого из запроса) набора tle. Пример её использования:

```
# Запросим данные о положении Landsat 8 11 мая 2016 года
# Обратите внимание, что даты указываем в формате date(y,m,d)
tle_1, tle_2 = get_spacetrack_tle (39084, date(2016,5,11), date(2016,5,12), USERNAME, PASSWORD)
print tle_1, tle_2

>>> 1 39084U 13008A   16132.92196421 +.00000109 +00000-0 +34320-4 0  9999
>>> 2 39084 098.2260 203.0765 0001471 094.1169 266.0197 14.57124417160799

# А теперь данные об актуальном положении
tle_1, tle_2 = get_spacetrack_tle (39084, None, None, USERNAME, PASSWORD, True)
print tle_1, tle_2

>>> 1 39084U 13008A   16354.79369944  .00000065  00000-0  24444-4 0  9999
>>> 2 39084  98.2045  61.9547 0001318  94.3108 265.8241 14.57119154204938
```

Расчёт координат проекции спутника

[править]

```
# Импортируем библиотеки
# Штатная библиотека для работы со временем
from datetime import datetime, date
# Ключевой класс библиотеки pyorbital
from pyorbital.orbital import Orbital

# Ещё одна простая функция, для демонстрации принципа.
# На вход она потребует две строки tle и время utc в формате datetime.datetime
def get_lat_lon_sgp (tle_1, tle_2, utc_time):
    # Инициализируем экземпляр класса Orbital двумя строками TLE
    orb = Orbital("N", line1=tle_1, line2=tle_2)
    # Вычисляем географические координаты функцией get_lonlatalt, её аргумент - время в UTC.
    lon, lat, alt = orb.get_lonlatalt(utc_time)
    return lon, lat
```

Пример использования:

```
# Используем данные TLE полученные вручную на space-track.org для спутника Terra
tle_1 = '1 25994U 99068A   16355.18348138  .00000089  00000-0  29698-4 0  9992'
tle_2 = '2 25994  98.2045  66.7824 0000703  69.9253 290.2059 14.57115924904601'
# Нас интересует текущий момент времени
utc_time = datetime.utcnow()
# Обращаемся к фукнции и выводим результат
lon, lat = get_lat_lon_sgp (tle_1, tle_2, utc_time)
print lon, lat

>>> 175.589796941 -13.6408377148
```

Создание набора геоданных с треком спутника

[править]

Теперь объединим получение данных space-track и расчёт положения спутника, добавив создание точечного шейп-файла. Зададимся целью написать функцию, которая бы создавала точечный шейп-файл с положениями спутника в течение указанных суток с заданным шагом по времени, в атрибуты каждой точки записывая широту, долготу и время пролёта.

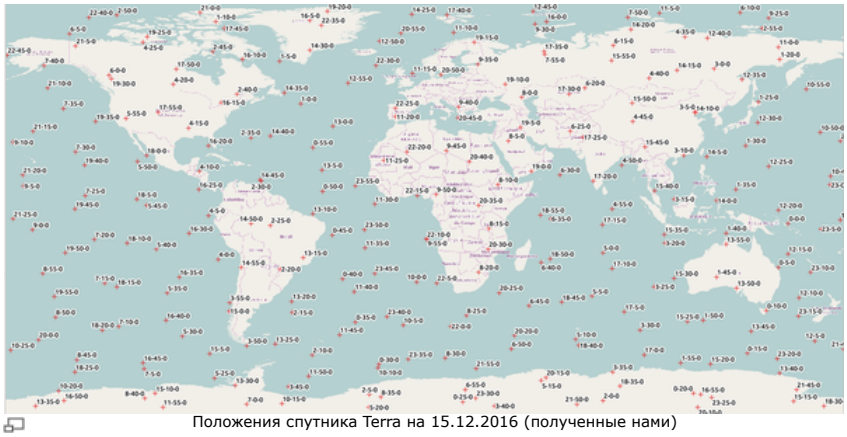
```
# Импортируем библиотеки - для начала оговоренные ранее
from datetime import datetime, date, timedelta
import spacetrack.operators as op
from spacetrack import SpaceTrackClient
from pyorbital.orbital import Orbital

# И pyshp, которая понадобится для создания шейп-файла
import shapefile

# Имя пользователя и пароль
USERNAME = <YOUR SPACE-TRACK USERNAME>
PASSWORD = <YOUR SPACE-TRACK PASSWORD>

# Уже описанная ранее функция get_spacetrack_tle может использоваться без изменений
def get_spacetrack_tle (sat_id, start_date, end_date, username, password, latest=False):
    st = SpaceTrackClient(identity=username, password=password)
    if not latest:
        daterange = op.inclusive_range(start_date, end_date)
        data = st.tle(norad_cat_id=sat_id, orderby='epoch desc', limit=1, format='tle', epoch = daterange
    else:
```

```
        data = st.tle_latest(norad_cat_id=sat_id, orderby='epoch desc', limit=1, format='tle')

    if not data:
        return 0, 0

    tle_1 = data[0:69]
    tle_2 = data[70:139]
    return tle_1, tle_2

# А вот функция get_lat_lon_sgp нам уже не пригодится в своём виде
# ведь создавать экземпляр класса Orbital для каждого момента времени
# не очень-то хочется

# На вход будем требовать идентификатор спутника, день (в формате date (y,m,d))
# шаг в минутах для определения положения спутника, путь для результирующего файла
def create_orbital_track_shapefile_for_day (sat_id, track_day, step_minutes, output_shapefile):
    # Для начала получаем TLE
    # Если запрошенная дата наступит в будущем, то запрашиваем самые последний набор TLE
    if track_day > date.today():
        tle_1, tle_2 = get_spacetrack_tle (sat_id, None, None, USERNAME, PASSWORD, True)
    # Иначе на конкретный период, формируя запрос для указанной даты и дня после неё
    else:
        tle_1, tle_2 = get_spacetrack_tle (sat_id, track_day, track_day + timedelta(days = 1), USERNAME, I

    # Если не получилось добыть
    if not tle_1 or not tle_2:
        print 'Impossible to retrieve TLE'
        return

     # Создаём экземляр класса Orbital
    orb = Orbital("N", line1=tle_1, line2=tle_2)

    # Создаём экземпляр класса Writer для создания шейп-файла, указываем тип геометрии
    track_shape = shapefile.Writer(shapefile.POINT)

    # Добавляем поля - идентификатор, время, широту и долготу
    # N - целочисленный тип, C - строка, F - вещественное число
    # Для времени придётся использовать строку, т.к. нет поддержки формата "дата и время"
    track_shape.field('ID','N',40)
    track_shape.field('TIME','C',40)
    track_shape.field('LAT','F',40)
    track_shape.field('LON','F',40)

    # Объявляем счётчики, i для идентификаторов, minutes для времени
    i = 0
    minutes = 0

    # Простой способ пройти сутки - с заданным в минутах шагом дойти до 1440 минут.
    # Именно столько их в сутках!
    while minutes < 1440:
        # Расчитаем час, минуту, секунду (для текущего шага)
        utc_hour = int(minutes // 60)
        utc_minutes = int((minutes - (utc_hour*60)) // 1)
        utc_seconds = int(round((minutes - (utc_hour*60) - utc_minutes)*60))

        # Сформируем строку для атрибута
        utc_string = str(utc_hour) + '-' + str(utc_minutes) + '-' + str(utc_seconds)
        # И переменную с временем текущего шага в формате datetime
        utc_time = datetime(track_day.year,track_day.month,track_day.day,utc_hour,utc_minutes,utc_seconds

        # Считаем положение спутника
        lon, lat, alt = orb.get_lonlatalt(utc_time)

        # Создаём в шейп-файле новый объект
        # Определеяем геометрию
        track_shape.point(lon,lat)
        # и атрибуты
        track_shape.record(i,utc_string,lat,lon)

        # Не забываем про счётчики
        i += 1
        minutes += step_minutes

    # Вне цикла нам осталось записать созданный шейп-файл на диск.
    # Т.к. мы знаем, что координаты положений ИСЗ были получены в WGS84
    # можно заодно создать файл .prj с нужным описанием

    try:
        # Создаем файл .prj с тем же именем, что и выходной .shp
        prj = open("%s.prj" % output_shapefile.replace('.shp',''), "w")
        # Создаем переменную с описанием EPSG:4326 (WGS84)
        wgs84_wkt = 'GEOGCS["WGS 84",DATUM["WGS_1984",SPHEROID["WGS 84",6378137,298.257223563]],PRIMEM["G
        # Записываем её в файл .prj
        prj.write(wgs84_wkt)
        # И закрываем его
        prj.close()
        # Функцией save также сохраняем и сам шейп.
        track_shape.save(output_shapefile)
    except:
        # Вдруг нет прав на запись или вроде того...
        print 'Unable to save shapefile'
        return
```

Вот и всё, давайте проверим, как это работает, и проверим корректность! Данные о положении спутника Terra с частотой 5 минут публикуются на специальном сервисе Space Science and Engineering Data Center , с ним и сверимся. Смоделируем положения на 15 декабря 2016 года и визуализируем получившийся набор геоданных в QGIS.

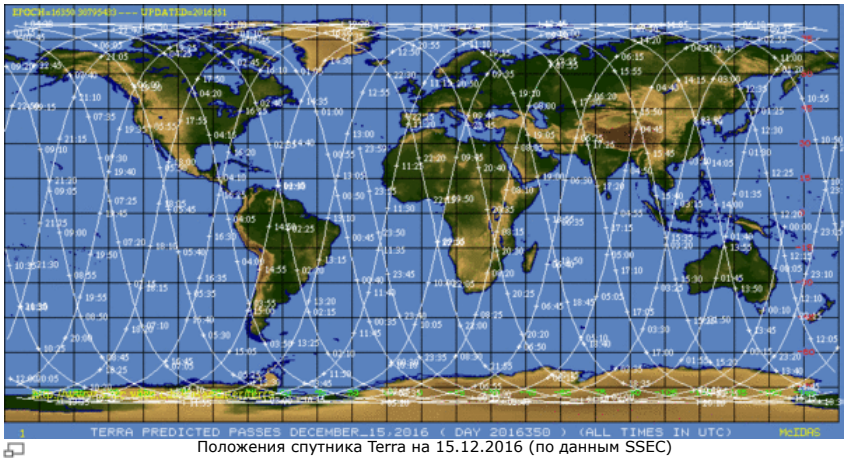
```
create_orbital_track_shapefile_for_day(25994, date(2016,12,15), 5, '/home/silent/space/terra_15_12_2016_5
```

Настроив в QGIS подписи и подложив OSM получим следующую картинку:



Положения спутника Terra на 15.12.2016 (полученные нами)

Найдём данные на тот же день у Space Science and Engineering Data Center:



Положения спутника Terra на 15.12.2016 (по данным SSEC)

Всё прекрасно сходится! Узнаем, где будет Landsat 8 в будущем? Например, 22 декабря 2016.

```
create_orbital_track_shapefile_for_day(39084, date(2016,12,22), 5, '/home/silent/space/landsat_8_22_12_20
```

Положения спутника Landsat 8 на 22.12.2016

Представляя себе полосу съемки, можно оценить охват снятой территории за 1 день.

В коде показан механизм, который несложно приспособить под собственные задачи. Таким образом можно осуществлять автоматизацию поиска и загрузки архивных данных, прогнозирование пролётов. Важно помнить, что в зависимости от особенностей аппаратуры, установленной на спутнике, соотношение между треком пролёта и снятой территорий будет сильно разниться. К примеру, Sentinel-1 оснащен радиолокатором бокового обзора, его наблюдения не надирные; полосы съемки MODIS (Terra) и ETM+ (Landsat) отличаются на порядки по степени охвата (хотя треки похожи); и так далее.

Источники [править]

1. Felix R. Hoots, Ronald L. Roehrich. SPACETRACK REPORT NO. 3 - Models for Propagation of NORAD Element Sets. December 1980

2. David A. Vallado, Paul Crawford. SGP4 Orbit Determination

3. NORAD Two-Line Element Set Format