

Модели сценариев спутниковой связи в пакете расширения Satellite Communication Toolbox

А. О. Тишков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

anton.tishkov.2000@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются функциональные возможности пакета MATLAB Satellite Communication Toolbox, предназначенного для моделирования, анализа и визуализации моделей сценариев спутниковых систем связи. Приведены основные объекты и функции, используемые при построении сценариев, расчёте параметров орбит, моделировании каналов связи и взаимодействии между спутниками и наземными станциями. Особое внимание уделено объектно-ориентированной архитектуре моделирования, которая позволяет комплексно исследовать различные аспекты спутниковых сетей связи. Благодаря широкому функционалу инструментария пакета расширения Satellite Communication Toolbox значительно упрощается процесс проектирования, моделирования, проверки систем и каналов спутниковой связи в различных сценариях функционирования.

Ключевые слова: визуализация сценариев спутниковой связи, Satellite Communication Toolbox, MATLAB, моделирование спутниковых систем, спутниковая связь

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время спутниковые системы связи на протяжении двадцати лет находятся в процессе коммерческой эксплуатации. Современные спутниковые системы связи играют ключевую роль в обеспечении глобального покрытия и поддержке сетей пятого поколения [1, 2]. Для анализа и моделирования таких систем в среде MATLAB разработан пакет расширения Satellite Communication Toolbox, предоставляющий исследователям мощные инструменты для построения сценариев орбит, моделирования каналов передачи данных и проектирования антенн. Возможности пакета демонстрируют эффективность решения учебных и прикладных задач в области спутниковой связи. В данной статье приведён обзор ключевых функций и объектов этого пакета, а также описание их применения при моделировании систем спутниковой связи, оценка средств расчёта и визуализации орбитальных характеристик, демонстрация практического применения пакета на нескольких примерах моделирования спутниковых сценариев. Целью данной работы является исследование функциональных возможностей Satellite Communication Toolbox для моделирования сценариев спутниковой связи и анализ практических результатов, получаемых при использовании данного пакета расширения.

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ СЦЕНАРИЕВ В СРЕДЕ MATLAB

A. Создание и визуализация спутникового сценария

Спутниковый сценарий может быть произведён с помощью среды MATLAB с использованием трёхмерной среды показанной на рис. 1. Представление модели спутникового сценария реализовано с помощью объекта *satelliteScenario*.



Рис. 1. Трёхмерная среда спутникового сценария в среде MATLAB

B. Функциональные возможности Satellite Communication Toolbox

Пакет расширения Satellite Communication Toolbox представляет собой особый набор функций, объектов и приложений предназначенный для моделирования, анализа и визуализации сценариев спутниковой связи. К числу задач, относящихся к основным принципам построения систем спутниковой связи, можно отнести: определение орбитальных параметров для спутников и расчёт их текущего местоположения в пространстве, оценка условий видимости с наземными станциями, визуализация спутникового сценария, использование специальных файлов, траекторий движения и зон покрытия, а также анализ временных интервалов в рамках спутникового сценария [3, 4]. Рассмотрим некоторые объекты и функции пакета расширения Satellite Communication Toolbox подробнее.

Объект *satelliteScenario* реализует трёхмерное пространство, включающее спутники, наземные станции и связи между ними. Он применяется для моделирования спутниковых группировок, построения сетей наземных станций, анализа доступа между спутниками и наземными станциями и отображении полученных результатов.

В среде MATLAB объект *satelliteScenario* создаётся одним из следующих способов:

- 1) С параметрами по умолчанию: $sc = satelliteScenario$;
- 2) С пользовательскими временными параметрами $startTime$, $stopTime$, $sampleTime$:
 $sc = satelliteScenario(startTime, stopTime, sampleTime)$.

Информация о свойствах объекта *satelliteScenario* продемонстрирована в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. СВОЙСТВА ОБЪЕКТА SATELLITESCENARIO

Свойство	Назначение
<i>startTime</i>	Время начала симуляции спутникового сценария
<i>stopTime</i>	Время остановки симуляции спутникового сценария
<i>sampleTime</i>	Шаг расчёта симуляции спутникового сценария

С помощью функция *satellite* можно добавить спутники в сценарий, используя TLE-файл (*two-line element*). Этот файл содержит двустрочный набор параметров, описывающих информацию об орбите спутника. Файл TLE представляет собой кодировку списка элементов орбиты объекта (спутника), вращающегося вокруг земли для заданного момента времени – эпохи. Параметры орбит могут быть закодированы в виде текста в различных форматах, однако данный формат был определен организацией NORAD и, соответственно, используется в NORAD, NASA и других системах, которые используют эти данные для определения положения интересующих космических объектов. В этом формате каждый спутник представлен в виде набора из заголовка и двух строк, где заголовок содержит название спутника, а две строчки имеют стандартный набор орбитальных параметров. Пример набора параметров представлен на рис. 2.

```
Satellite 1
1 25544U 98067A 04236.56031392 .00020137 00000-0 16538-3 0 9993
2 25544 51.6335 344.7760 0007976 126.2523 325.9359 15.70406856328906
```

Рис. 2. Набор параметров из TLE-файла

В табл. 2 и табл. 3 представлен набор параметров используемых в TLE-файле:

ТАБЛИЦА II. СТРУКТУРА ПЕРВОЙ СТРОКИ TLE-ФАЙЛА

Положение	Содержание	Пример
1	Номер строки	1
3-7	Номер спутника в базе данных NORAD	25544
8	Классификация	U
10-17	Международное обозначение	98067A
19-32	Год и время эпохи	04236.56031392
34-43	Первая производная от среднего движения	.00020137
45-52	Вторая производная от среднего движения	00000-0
54-61	Коэффициент торможения	16538-3
63	Тип набора элементов	0
65-68	Номер элемента	999
69	Контрольная сумма по модулю 10	3

ТАБЛИЦА III. СТРУКТУРА ВТОРОЙ СТРОКИ TLE-ФАЙЛА

Положение	Содержание	Пример
1	Номер строки	2
3-7	Номер спутника в базе данных NORAD	25544
9-16	Наклонение в градусах	51.6335

Положение	Содержание	Пример
18-25	Долгота восходящего узла в градусах	344.7760
27-33	Эксцентриситет	0007976
35-42	Аргумент перицентра в градусах	126.2523
44-51	Средняя аномалия в градусах	325.9359
53-63	Частота обращения	15.70406856
64-68	Номер витка на момент эпохи	32890
69	Контрольная сумма по модулю 10	6

Функция *satellite* задаётся с помощью следующего кода:

```
sat = satellite(scenario,file).
```

Здесь *scenario* обозначает ранее созданный спутниковый сценарий, а *file* означает имя используемого TLE-файла.

Объект *groundTrack* задаёт траекторию движения наземных трасс для каждого спутника в сценарии спутниковой связи на основе их текущего местоположения. Свойства, используемые объектом, указаны в табл. 4. Объект *groundTrack* в среде MATLAB создаётся таким образом:

- 1) Создание траектории движения наземной трассы по умолчанию:

```
groundTrack(sat);
```

- 2) Создание траектории движения наземной трассы с помощью свойств *LeadTime* и *TrailTime*:

```
groundTrack(sat, "LeadTime", "TrailTime").
```

ТАБЛИЦА IV. СВОЙСТВА ОБЪЕКТА GROUNDTRACK

Свойство	Назначение
<i>LeadTime</i>	Период будущей траектории спутника
<i>TrailTime</i>	Период пройденной траектории спутника

Функция *groundStation* добавляет наземную станцию в сценарий спутниковой связи. Для данного объекта могут указываться: название наземной станции и географические координаты, такие как широта и долгота (табл. 5). Реализация функции *groundStation* в среде MATLAB:

```
groundStation(scenario, "Name", "Latitude", "Longitude").
```

ТАБЛИЦА V. СВОЙСТВА ОБЪЕКТА GROUNDSTATION

Параметр	Назначение
<i>Name</i>	Название наземной станции
<i>Latitude</i>	Широта наземной станции
<i>Longitude</i>	Долгота наземной станции

Функция *orbitalElements* отображает орбитальные параметры для каждого отдельного спутника. Функция в среде MATLAB создаётся следующим образом:

$ele = orbitalElements(sat(N))$, где N – номер спутника. Орбитальные параметры [2], которые задаются с помощью данной функции, представлены в табл. 6.

ТАБЛИЦА VI. ОРБИТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФУНКЦИИ ORBITALELEMENTS

Параметр	Назначение
<i>MeanMotion</i>	Частота обращения
<i>Eccentricity</i>	Эксцентриситет орбиты
<i>Inclination</i>	Наклонение
<i>RightAscensionOfAscendingNode</i>	Долгота в градусах
<i>ArgumentOfPeriapsis</i>	Аргумент перицентра

Параметр	Назначение
MeanAnomaly	Средняя аномалия
Period	Период обращения
Epoch	Эпоха
BStar	Коэффициент обращения

Функция *states* предназначена для определения местоположения и скорости спутника в пространстве в заданный момент времени. Данную функцию необходимо задавать в конкретный момент времени, иначе функция вернёт местоположение и скорость в момент начала сценария: $pos = states(sat, time)$.

Функция *aer* предназначена для расчёта трёх параметров взаимного расположения между двумя объектами в спутниковой сценарии азимута, угла места, и дальности. В табл. 7 продемонстрированы параметры, используемые для данной функции:

$$[az, elev, r] = aer(gs, sat, time).$$

ТАБЛИЦА VII. ПАРАМЕТРЫ ФУНКЦИИ AER

Параметр	Назначение
Азимут (<i>az</i>)	Угол в плоскости, отсчитываемый от положительного направления до проекции объекта
Угол места (<i>elev</i>)	Угол между плоскостью и направлением на объект
Дальность (<i>r</i>)	Расстояние между объектом началом системы координат

Функция *pointAt* применяется для автоматического наведения объектов спутниковой сценарии (спутник, карданный подвес, спутниковая платформа) на заданную цель и реализуется следующим образом: $pointAt(gimbal, target)$.

Функция *access* применяется для создания объектов анализа доступа между элементами спутниковой сценарии. Она позволяет определить, когда и как долго два объекта могут взаимодействовать друг с другом с учётом заданных геометрических и физических ограничений: $ac = access(asset1, asset2)$.

С. Примеры моделирования спутниковых сценариев в среде MATLAB

Для демонстрации возможностей пакета расширения Satellite Communication Toolbox были исследованы и проанализированы три спутниковых сценария.

Первый сценарий предназначен для демонстрации базовых возможностей моделирования орбитального движения спутников и визуализации их положения относительно Земли [5]. В данном сценарии создаётся трёхмерная модель, в которой задаются временные параметры моделирования: начальное время, конечное время и шаг дискретизации. После создания сценария в него добавляются спутники и наземные станции. Орбиты спутников задаются с использованием файлов TLE, а также с помощью орбитальных параметров. Средство визуализации позволяет отобразить трёхмерную модель Земли и орбит спутников, а также динамически рассматривать их движение во времени. Данный сценарий демонстрирует базовую архитектуру моделирования спутниковых систем в MATLAB и позволяет наглядно наблюдать движение спутников и их взаимодействие с наземными станциями.



Рис. 3. Моделирование базового спутникового сценария

Второй сценарий моделирует спутниковую связь через спутниковую сеть между двумя наземными станциями [6]. В данном случае две наземные станции не имеют прямой видимости друг с другом, поэтому передача данных осуществляется через несколько спутников, образующих промежуточные узлы сети. В процессе моделирования формируется спутниковая группировка, после чего определяется доступность связи между каждым элементом сети. MATLAB автоматически вычисляет интервалы времени, в течение которых между объектами существует прямая видимость. На основе этих данных формируется маршрут передачи данных через несколько спутников. Данная передача является важным элементом современных спутниковых сетей, особенно в системах низкоорбитальных группировок. Такая архитектура позволяет расширить зону покрытия сети, повысить устойчивость связи и обеспечить передачу данных на большие расстояния. Кроме того, данный сценарий демонстрирует возможность анализа маршрутов передачи данных через спутниковую группировку и оценки доступности каналов связи.

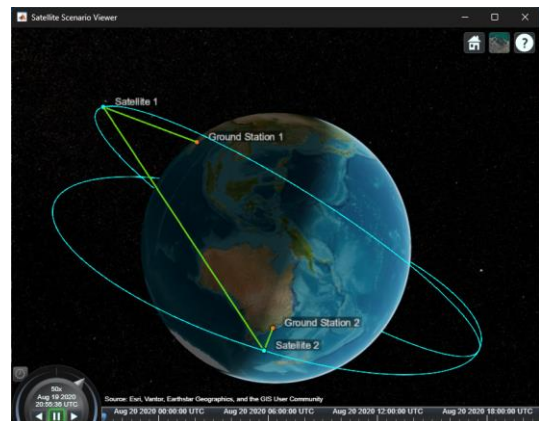


Рис. 4. Моделирование спутникового сценария, осуществляющего связь между двумя наземными станциями

Третий сценарий посвящён анализу доступа спутниковой группировки к наземной станции [7]. В данном случае моделируется несколько спутников, находящихся на различных орбитах, и определяется, какие из них находятся в зоне видимости наземной станции в определённые моменты времени. При выполнении моделирования MATLAB рассчитывает интервалы доступа между каждым спутником и наземной станцией. Эти интервалы показывают периоды

времени, когда спутник находится выше линии горизонта и может обеспечивать радиосвязь с наземной станцией. Полученные результаты позволяют определить, какие спутники обеспечивают непрерывное покрытие заданной территории, а также оценить эффективность конфигурации спутниковой группировки. Такой анализ широко используется при проектировании систем глобальной спутниковой связи и навигации. Моделирование данного спутникового сценария отображает положение спутников на орбитах и линии связи с наземной станцией в те моменты времени, когда доступность канала существует.

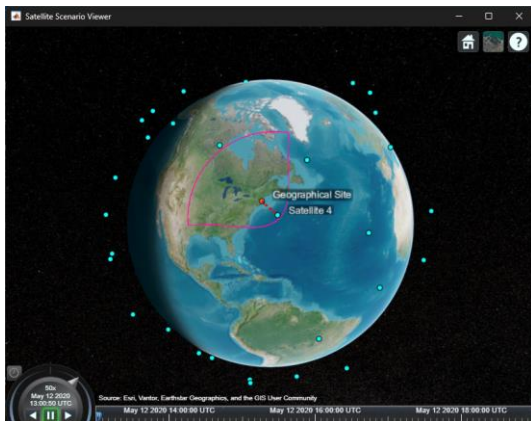


Рис. 5. Моделирование доступа спутниковой группировки к наземной станции

D. Результаты

В результате выполненной работы были исследованы три спутниковых сценария моделирования спутниковых систем связи. Первый сценарий позволил продемонстрировать базовые возможности создания спутникового сценария, моделирования движения спутников и визуализации их орбит в трёхмерной среде. Второй сценарий показал возможность моделирования спутниковой передачи данных между наземными станциями через спутниковую группировку, что позволяет анализировать маршруты передачи сигнала и

интервалы доступности связи. Третий сценарий позволил исследовать доступ спутниковой группировки к наземной станции и определить временные интервалы, в течение которых спутники находятся в зоне радиовидимости наземной станции.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были исследованы функциональные возможности пакета расширения MATLAB Satellite Communication Toolbox для моделирования спутниковых сценариев. Рассмотрены основные объекты и функции, используемые для создания спутниковых группировок, добавления наземных станций и анализа орбитальных параметров спутников. Проведённое моделирование показало, что данный пакет расширения предоставляет удобные средства для анализа доступности каналов связи, визуализации орбитальных траекторий и исследования взаимодействия между спутниками и наземными станциями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Чечин Г.В., Спутниковые системы связи негеостационарных ретрансляторов, Горячая линия – Телеком, 2022, 102 с.
- [2] Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2019. 432 с.
- [3] Кукк К. И., Спутниковая связь: прошлое, настоящее, будущее. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 256 с.
- [4] Сомов А. М., Корнев С. Ф., Спутниковые системы связи: Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия–Телеком, 2012. 244 с.
- [5] Satellite Communication Toolbox. Model, Visualize and Analyze Satellite Scenario. MathWorks. [Электронный ресурс] URL: <https://www.mathworks.com/help/satcom/gs/model-and-visualize-satelliteScenario.html> (Дата обращения: 02.03.2026)
- [6] Satellite Communication Toolbox. Satellite Constellation Access to Ground Station. MathWorks. [Электронный ресурс] URL: <https://mathworks.com/help/satcom/ug/satellite-constellation-access-to-groundstation.html> (Дата обращения: 04.03.2025)
- [7] Satellite Communication Toolbox. Multi-Hop Satellite Communication Link between Two Ground Station. MathWorks. [Электронный ресурс] URL: <https://mathworks.com/help/satcom/ug/multihop-satellite-communication.html> (Дата обращения: 04.03.2025)