

# ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОЗВЕЗДИЯ СПУТНИКОВ IUVIT

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА.

Предлагается создание созвездия нано- и пикоспутников, формирующих инфраструктуру для IoT (Internet of Things, интернета вещей) на основе протоколов связи LoRaWAN<sup>1</sup> и обеспечивающих устойчивую передачу данных повышенной важности.

Возможные применения системы:

1. Телемедицина.
2. Контроль и управление стратегической инфраструктурой.
3. Сельское хозяйство.
4. Геопозиционирование.
5. Добыча природных ресурсов (контроль и управление автономным оборудованием).
6. Предупреждение и предотвращение техногенных катастроф и стихийных бедствий.
7. Контроль экологического состояния среды.

В зависимости от типа спутников, скорости передачи данных могут варьироваться от сотен бит до сотен мегабит в секунду. Время задержки сигнала колеблется от 30 до 50 мс (при условии прямой видимости спутника).

### ТРЕБОВАНИЯ К СОЗВЕЗДИЮ СПУТНИКОВ.

1. **Минимально возможная высота полёта** (Требуется обеспечить минимальную дистанцию радиопередачи для устойчивой работы LoRaWAN).
2. **Минимально возможный LoS gap<sup>2</sup>** (Требуется обеспечить возможно большее время прямой видимости спутников созвездия для решения поставленных задач).
3. **Минимально возможная стоимость развертывания и эксплуатации.**

### АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ.

Исходя из требований 1 и 3, приходится отбросить высокие орбиты, хотя они обеспечивают минимальный гар. Также, учитывая требование 3, требуется рассматривать коммерчески доступные LEO<sup>3</sup>. Кроме того, учитывая что в качестве одной из задач заявлено геопозиционирование, следует стремиться обеспечить видимость не менее 4-х спутников.

---

<sup>1</sup> **LoRaWAN** - Low Power Wide Area Networking, протокол беспроводной связи малой мощности но большой дальности.

<sup>2</sup> LoS gap (Line of Sight gap) – «провал видимости», отсутствие связи во время между входами спутников в зону видимости наземных станций.

<sup>3</sup> LEO – Low Earth Orbit, орбита Земли с высотой полёта до 2000 км над уровнем моря.

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ.

Необходимо спроектировать траектории для созвездия спутников, удовлетворяющие следующим требованиям:

| Параметр                     |                     | Минимально                | Максимально |
|------------------------------|---------------------|---------------------------|-------------|
| LoS gap                      | На территории РК    | Менее 1 часа              | Минимальный |
|                              | В любой точке Земли | Не важен                  | Минимальный |
| Количество видимых спутников |                     | 1                         | 4 и более   |
| Тип орбиты                   |                     | Коммерчески доступная LEO |             |
| Количество запусков          |                     | Минимальное               |             |

## ВАРИАНТЫ ГЕОМЕТРИИ СОЗВЕЗДИЯ.

### ТРИВИАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ.

Данный вариант был сформулирован на основе простейших астродинамических выкладок и предложен как первоначальное решение. Он предполагает запуск 6 спутников на орбиты, близкие к орбите МКС (высота полёта порядка 430 км.), однако лежащие в 3 разных плоскостях. За счёт вращения Земли обеспечивается проход над каждой из точек Земли в диапазоне от 51.6 градуса с.ш. до 51.6 градуса ю.ш. под орбитами спутников. Небольшое наклонение обеспечивает относительно частое восхождение спутников над территорией РК, но, конечно же, не обеспечивает охват всей земной поверхности.

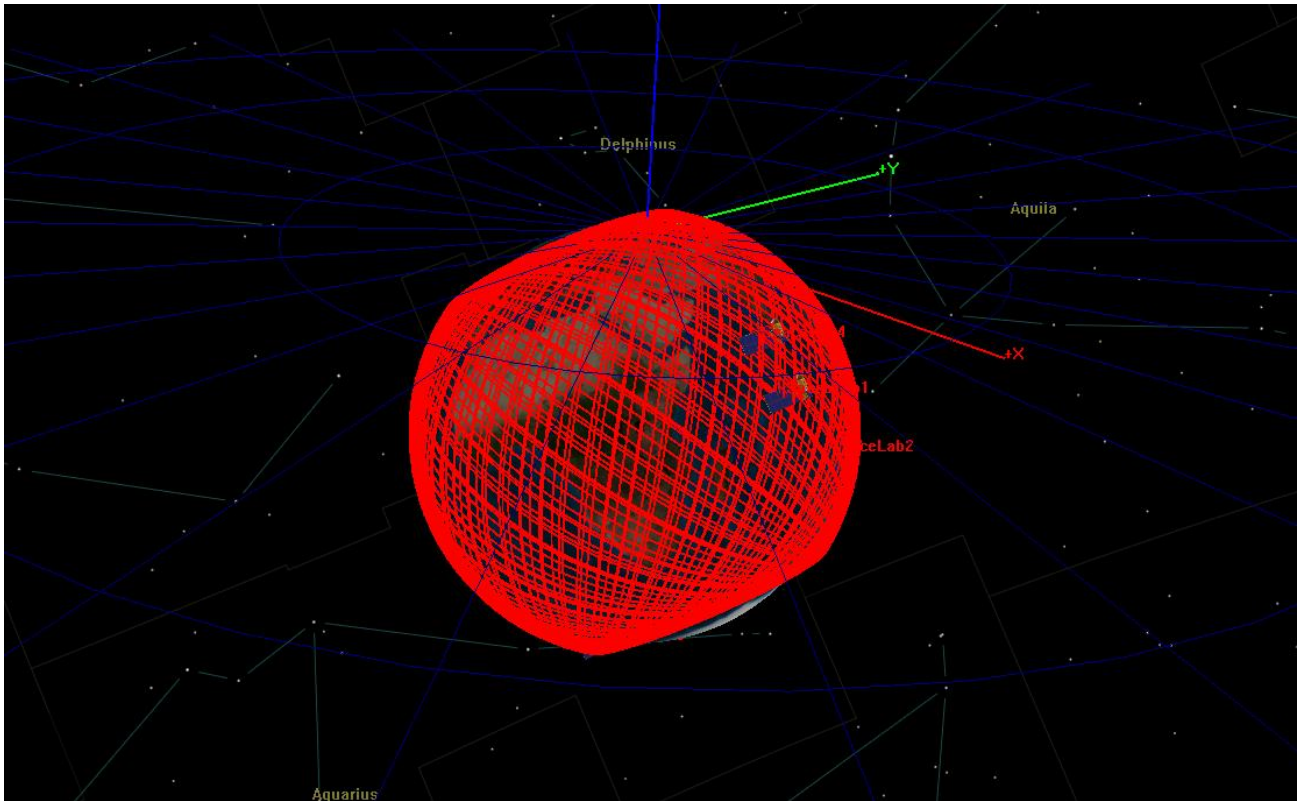


Figure 1: Траектория спутников для тривиальной геометрии 430@51.6

Groundtrack<sup>4</sup> спутников в этом варианте будет выглядеть вот так:

Groundtrack for 430.0 km@51.6°: 6/3/1

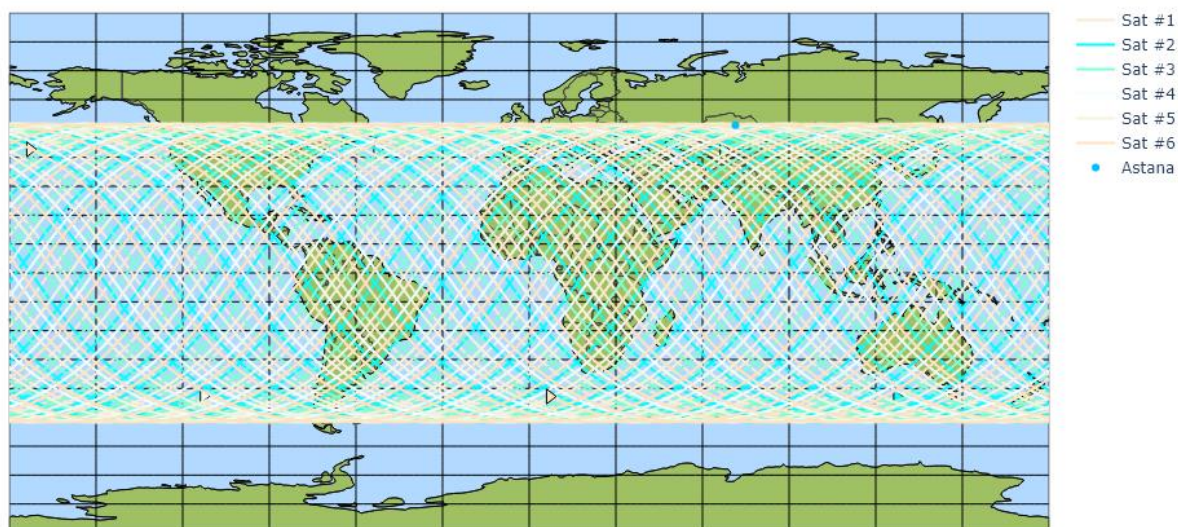


Figure 2: Groundtrack для тривиальной геометрии 430@51.6

Суточный график видимости спутников для наземной станции расположенной в Астане будет выглядеть вот так:

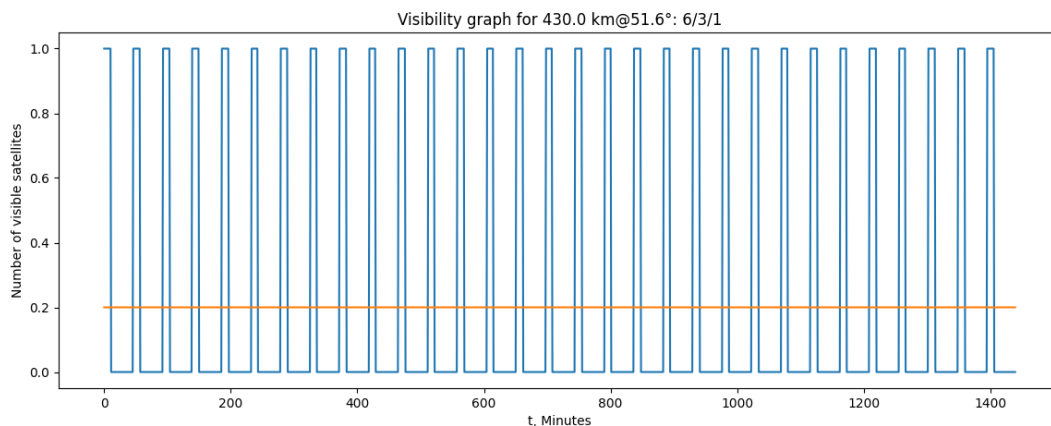


Figure 3: Суточный график видимости для г.Астана, для тривиальной геометрии 430@51.6

Эта геометрия является наиболее очевидной, и теоретически позволяет использовать наиболее дешёвые спутники без ДУ<sup>5</sup>. Изначально она была принята в качестве рабочего варианта, однако дальнейшее исследование показало, что она не является оптимальной.

<sup>4</sup> Groundtrack – проекция траектории полёта спутников на поверхность Земли.

<sup>5</sup> ДУ – двигательная установка.

## ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ТРИВИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ.

### Достоинства:

- Теоретическая простота построения.
- Улучшенный охват экваториальных областей планеты.

### Недостатки:

- Сложность построения на практике.
- Пересечение с орбитой МКС.
- Дороговизна эксплуатации.

По первоначальному предположению, для запуска созвездия можно было воспользоваться услугами компании [Voyager Space](#) (бывшей NanoRacks), и запускать спутники с помощью их пускового контейнера, установленного на МКС. Сформировать необходимые для созвездия три плоскости предполагалось с помощью прецессии линии узлов<sup>6</sup> орбиты МКС.

Однако дальнейшие расчёты показали, что:

1. Хотя прецессия МКС *действительно* обеспечивает выход в следующую орбитальную плоскость созвездия в течение 25 дней, **запущенные с неё спутники также прецессируют с почти той же скоростью**. Поэтому **на практике построить созвездие таким образом не получится** – потребуются дополнительные запуски в другие плоскости.
2. На орбите высотой 430 км **длительность существования лёгких пикоспутников оценивается в 3-8 месяцев, что существенно увеличивает стоимость владения созвездием** (его необходимо будет регулярно пополнять).

На основании этих расчётов был сделан вывод о том, что тривиальная геометрия созвездия не подходит для поставленной задачи.

## ГЕОМЕТРИИ WALKER DELTA.

Анализ методик построения созвездий спутников показал, что на сегодняшний день выработаны различные геометрии для низкоорбитальных спутниковых группировок. Учитывая требование 3, для построения созвездия IoVIT наиболее подходит геометрия Walker Delta, предложенная J.G.Walker в 1984 году<sup>7</sup>. Эта геометрия так же известна как «Ballard rosette» («цветок Балларда»).

Принцип построения геометрии Walker Delta называется Walker Delta Pattern. Варианты созвездий этого типа обозначаются в соответствии с нотацией **i: t/p/f**, где:

**i** – наклонение

**t** – общее количество спутников в созвездии

---

<sup>6</sup> Прецессия линии узлов – в общем случае, медленный проворот плоскости орбиты вокруг оси вращения Земли в западном направлении. Обусловлен несферичностью Земли.

<sup>7</sup> J. G. Walker, Satellite constellations, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 37, pp. 559-571, 1984

$p$  – количество орбитальных плоскостей (они распределяются с равным шагом по прямому восхождению восходящего узла<sup>8</sup> от 0 до 360 градусов)

$f$  – относительный угловой шаг идентичного спутника в следующей орбитальной плоскости относительно текущего спутника.

Walker Delta Pattern строится по принципу «Street of coverage», который за счёт шага  $f$  обеспечивает наиболее полное покрытие земной поверхности.

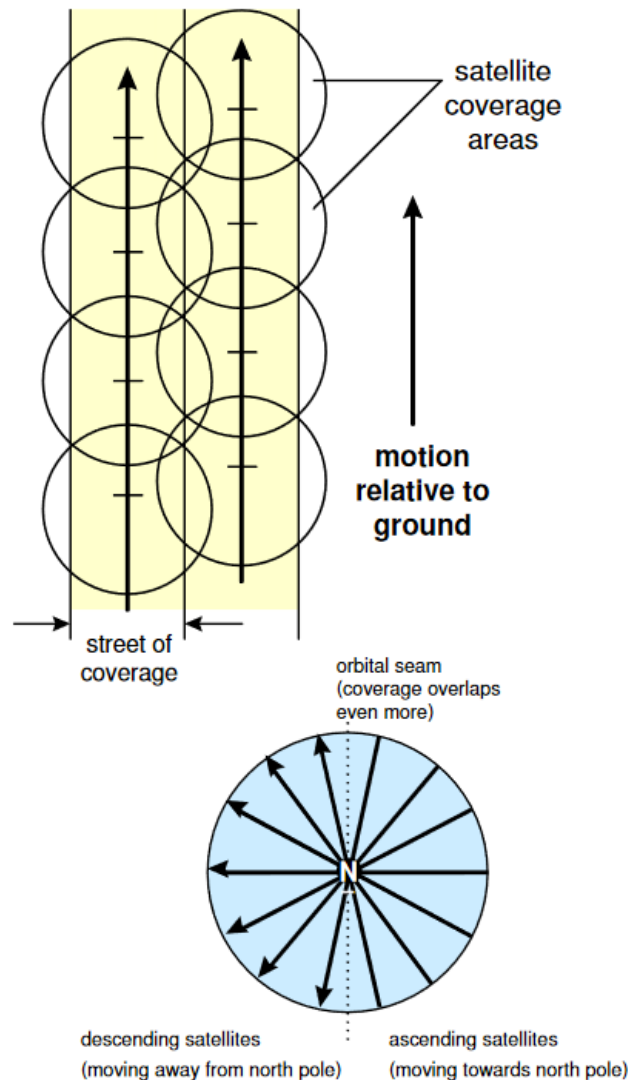


Figure 4: Принцип «Street of coverage» (видно шаговое смещение  $f$  для спутников, двигающихся в соседних плоскостях).

Также, Walker Delta Pattern сильно упрощает процедуру вывода – для его реализации требуются хорошо освоенные полярные орбиты, такие как солнечно-синхронная орбита<sup>9</sup> высотой 566 км.

<sup>8</sup> Прямое восхождение восходящего узла (RAAN) – параметр орбиты, определяющий угловое расстояние от линии равноденствий до точки в которой КА пересекает плоскость экватора Земли по направлению к полюсу.

<sup>9</sup> Солнечно-синхронная орбита (SSO) – тип орбиты, которая за счёт прецессии поворачивается так, что всё время оказывается над солнечной стороной Земли. Широко используется для спутников ДЗЗ.

Большинство частных космических компаний, такие как [SpaceX](#), предлагают регулярные полёты на SSO, что сильно упрощает процедуру запуска.

## АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ГЕОМЕТРИЙ WALKER DELTA.

Для оценки вариантов было проведено численное моделирование различных геометрий созвездия, построенных по Walker Delta Pattern.

Результаты анализа SSO 566 км приведены в следующей таблице:

Table 1: Результаты моделирования геометрии Walker Delta Pattern

| Название           | i, °  | t   | p | f    | MGT, мин. | RCT, д. | MeanNVS | MaxNVS |
|--------------------|-------|-----|---|------|-----------|---------|---------|--------|
| 97.68°: 6/3/1      | 97,68 | 6   | 3 | 1    | 37,55     | 0,37    | 0,37    | 1      |
| 97.68°: 12/3/1     | 97,68 | 12  | 3 | 1    | 20,43     | 0,66    | 0,75    | 2      |
| 97.68°: 12/6/0.25  | 97,68 | 12  | 6 | 0,25 | 30,2      | 0,5     | 0,59    | 2      |
| 97.68°: 12/6/0.5   | 97,68 | 12  | 6 | 0,5  | 30,25     | 0,5     | 0,59    | 2      |
| 97.68°: 12/6/1     | 97,68 | 12  | 6 | 1    | 30,2      | 0,5     | 0,59    | 2      |
| 97.68°: 24/3/0.25  | 97,68 | 24  | 3 | 0,25 | 0         | 1       | 1,49    | 3      |
| 97.68°: 24/3/0.5   | 97,68 | 24  | 3 | 0,5  | 0         | 1       | 1,49    | 3      |
| 97.68°: 24/3/1     | 97,68 | 24  | 3 | 1    | 0         | 1       | 1,49    | 3      |
| 97.68°: 24/6/0.25  | 97,68 | 24  | 6 | 0,25 | 20,55     | 0,66    | 1,18    | 3      |
| 97.68°: 24/6/0.5   | 97,68 | 24  | 6 | 0,5  | 20,55     | 0,66    | 1,18    | 3      |
| 97.68°: 24/6/1     | 97,68 | 24  | 6 | 1    | 20,43     | 0,66    | 1,18    | 3      |
| 97.68°: 48/6/0.25  | 97,68 | 48  | 6 | 0,25 | 0         | 1       | 2,36    | 4      |
| 97.68°: 48/6/0.5   | 97,68 | 48  | 6 | 0,5  | 0         | 1       | 2,36    | 4      |
| 97.68°: 48/6/1     | 97,68 | 48  | 6 | 1    | 0         | 1       | 2,36    | 4      |
| 97.68°: 72/6/0.25  | 97,68 | 72  | 6 | 0,25 | 0         | 1       | 3,55    | 5      |
| 97.68°: 96/6/0.25  | 97,68 | 96  | 6 | 0,25 | 0         | 1       | 4,73    | 6      |
| 97.68°: 120/6/0.25 | 97,68 | 120 | 6 | 0,25 | 0         | 1       | 5,91    | 7      |
| 97.68°: 144/6/0.25 | 97,68 | 144 | 6 | 0,25 | 0         | 1       | 7,1     | 8      |

Здесь:

**i,t,p,f** – параметры Walker Delta Pattern

**MGT** – mean gap time, средняя продолжительность gap, в минутах.

**RCT** – relative contact time, относительное полное время контакта, в днях.

**MeanNVS** – mean number of visible satellites, среднее количество видимых спутников.

**MaxNVS** – max number of visible satellites, максимальное количество видимых спутников.

Красным цветом выделены варианты геометрий, обеспечивающие полное покрытие (нулевую продолжительность gap).



## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЙ WALKER DELTA.

### МИНИМАЛЬНО ПРИЕМЛЕМАЯ ГЕОМЕТРИЯ.

На основании проведённого исследования, мы можем сказать, что минимальным поставленным требованиям удовлетворяет геометрия **97.68: 6/3/1**, обеспечивающая среднюю продолжительность гар около 40 минут.

Её графическое представление выглядит так:

Groundtrack for 566.9 km@97.68°: 6/3/1

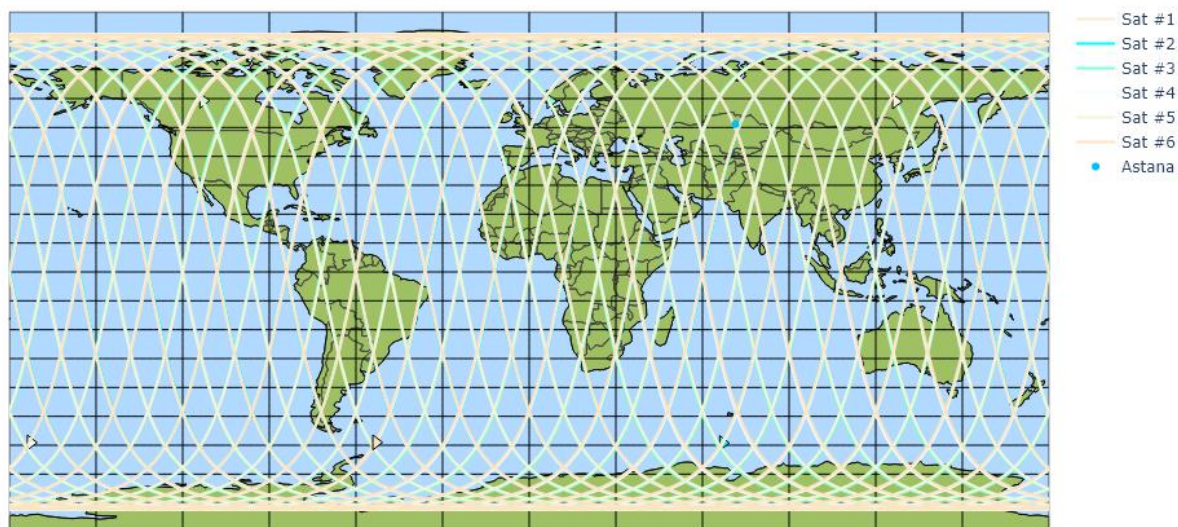


Figure 5: Groundtrack для Walker Delta 97.68: 6/3/1

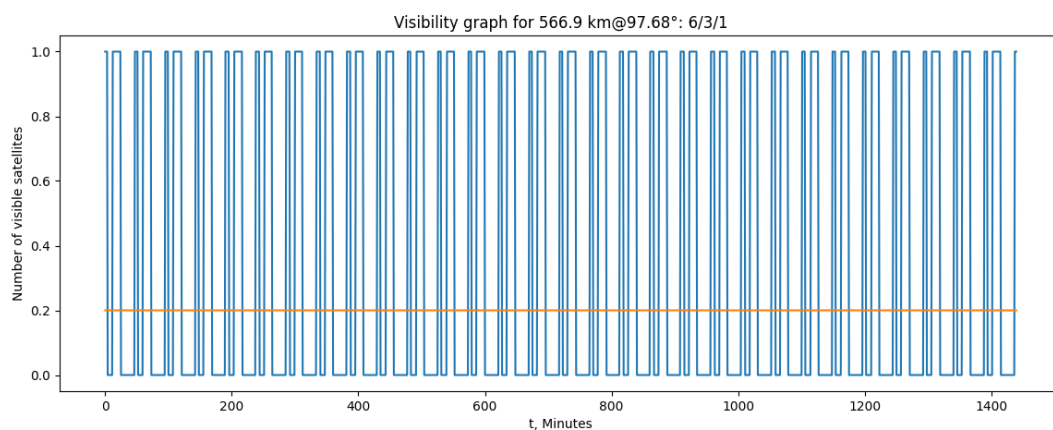


Figure 6: Суточный график видимости для г.Астана, для Walker Delta 97.68: 6/3/1

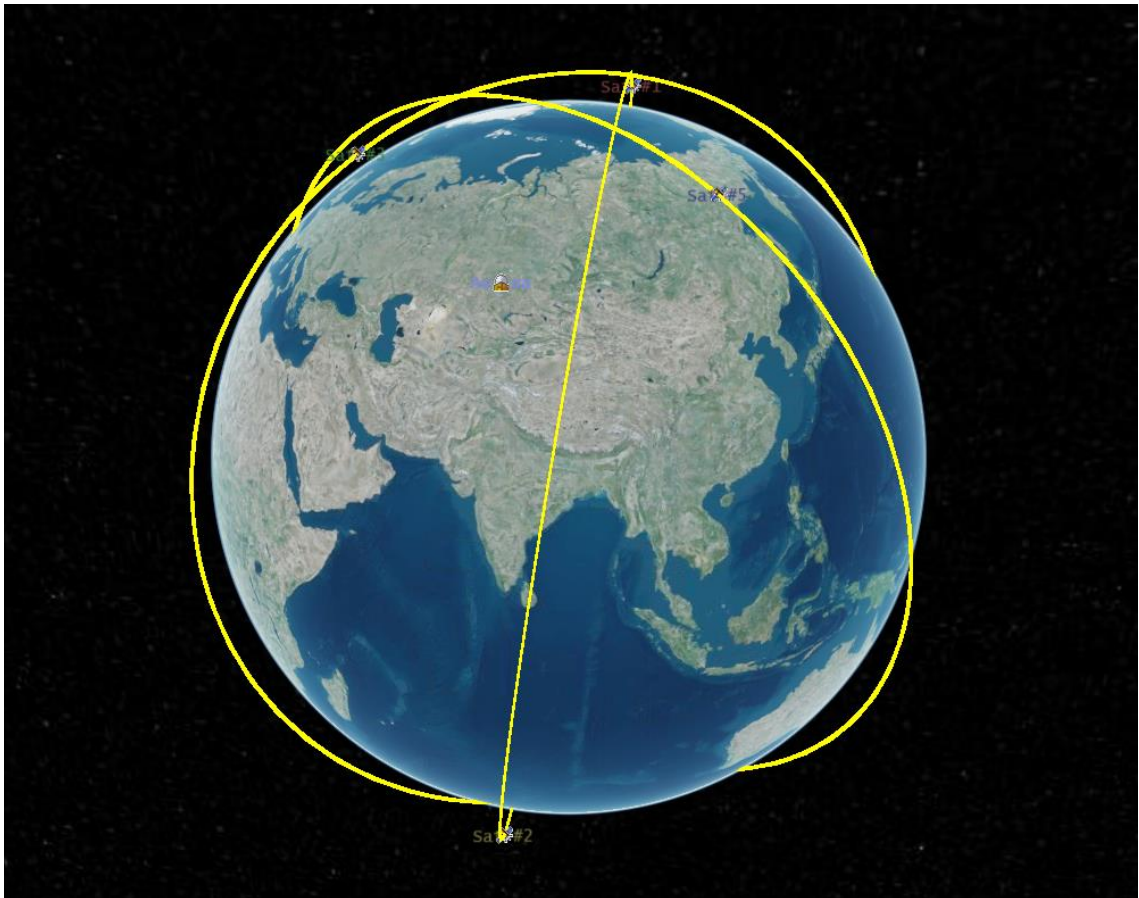


Figure 7: Визуализация траекторий для Walker Delta 97.68: 6/3/1

## ОПТИМАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ.

Исходя из таблицы, можно было бы предположить, что оптимально соответствующей задаче геометрией созвездия может быть **97.68: 96/6/0.25**, однако это не так. Моделирование показывает, что в некоторые моменты количество видимых спутников сокращается до трёх. Это видно на следующем графике:

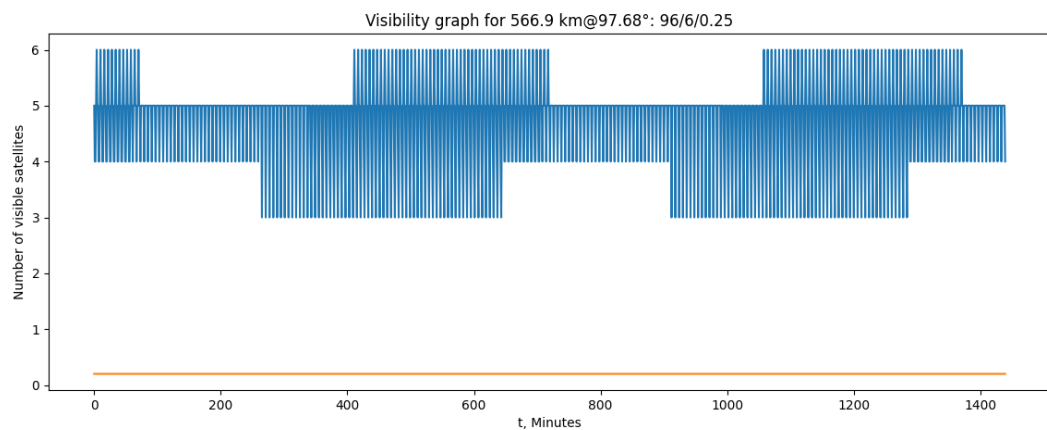


Figure 8: Суточный график видимости для г.Астана, для Walker Delta 97.68: 96/6/0.25



Фактически же, оптимальной геометрией является **97.68: 120/6/0.25**. Такая геометрия обеспечивает гарантированную видимость 5 спутников созвездия *всегда*.

Её графическое представление выглядит так:

Groundtrack for 566.9 km@97.68°: 120/6/0.25

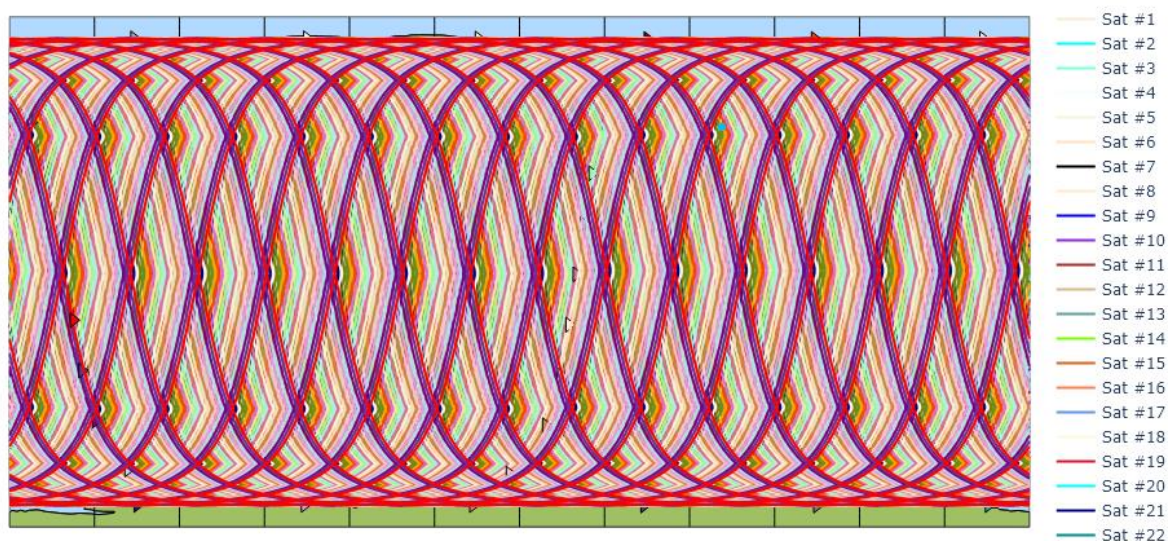


Figure 9: Groundtrack для Walker Delta 97.68: 120/6/0.25

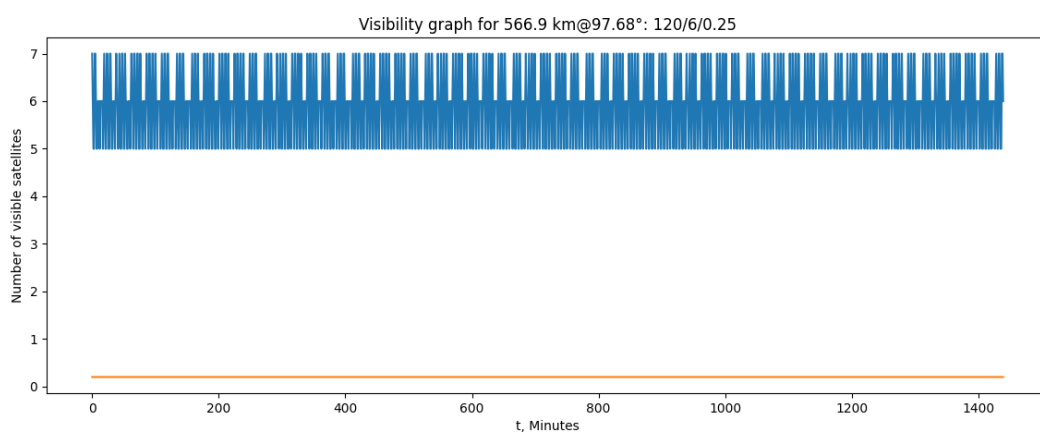


Figure 10: Суточный график видимости для г.Астана, для Walker Delta 97.68: 120/6/0.25

Данная геометрия является очень удобным созвездием, как с точки зрения вывода (требуется 6 запусков, каждый из которых запускает 20 спутников, которые по массе занимают как раз 1 полный грузовой слот на Falcon 9 Transporter), так и с точки зрения эксплуатации (спутники обеспечивают постоянный обмен информацией с Землёй).

Визуализация этой геометрии созвездия представлена на картинке ниже:

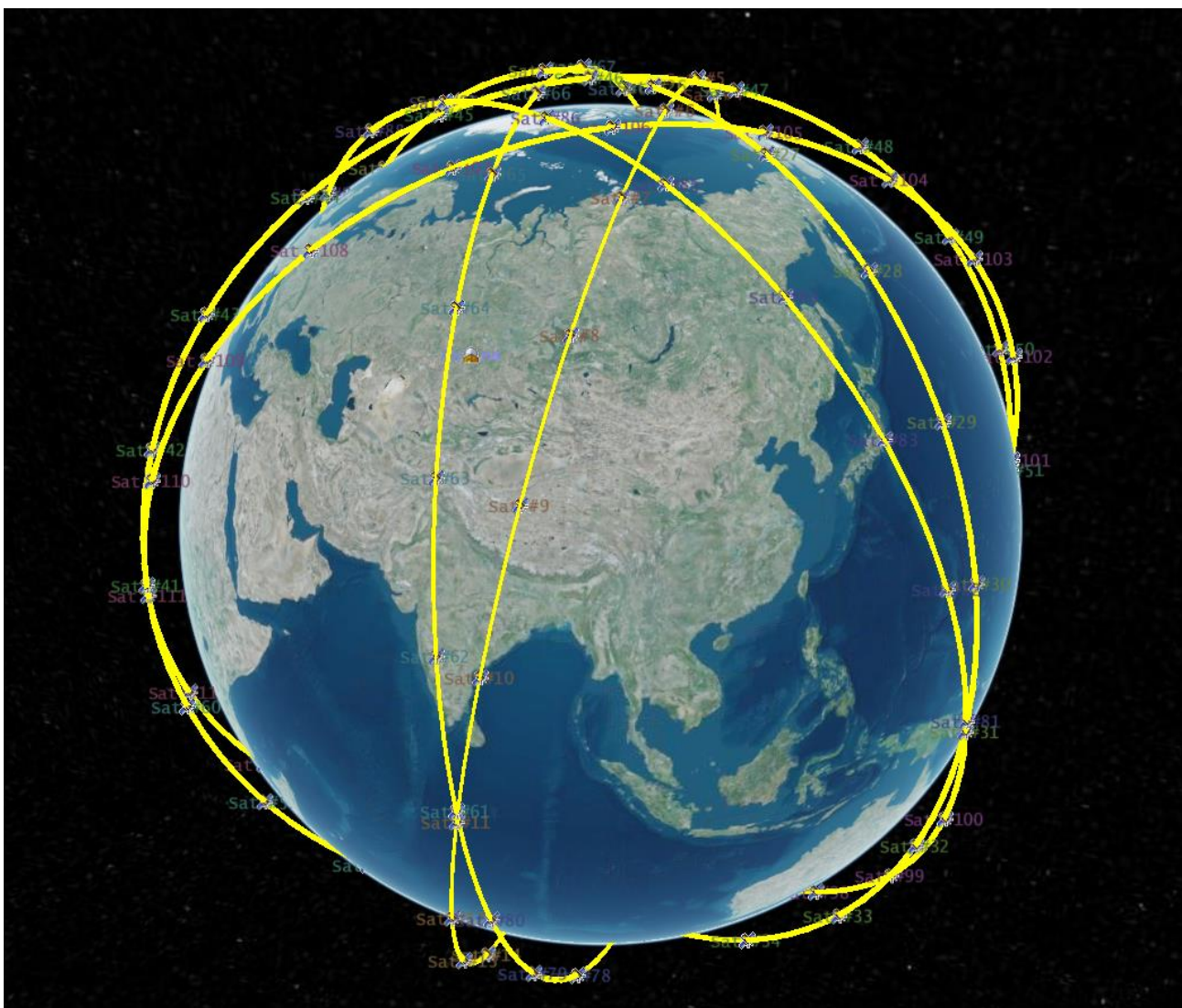


Figure 11: Визуализация траекторий для Walker Delta 97.68: 120/6/0.25

## ИНТЕРАКТИВНЫЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Интерактивные визуализации различных геометрий созвездия IoVIT можно изучить по ссылкам, приведённым ниже:

- Геометрия [97.68: 6/3/1](#)
- Геометрия [97.68: 24/3/0.25](#)
- Геометрия [97.68: 48/6/0.25](#)
- Геометрия [97.68: 72/6/0.25](#)
- Геометрия [97.68: 120/6/0.25](#)