**Список баллистических задач, решаемых программным комплексом.**

1. **Задача анализа периодичности наблюдения широты или широтного пояса одиночным спутником с нулевым фазовым состоянием**
2. Решение с помощью аналитических формул
3. Решение с помощью прямого моделирования движения спутника (оформить(
4. **Задача анализа периодичности наблюдения любой точки Земли одиночным спутником с произвольным фазовым состоянием**
   1. Решение с помощью аналитических формул
   2. Решение с помощью прямого моделирования движения спутника (оформить)
   3. Комбинированное решение с помощью аналитических формул и моделирования движения спутника (оформить)
5. **Задача анализа периодичности наблюдения широты или широтного пояса ярусом орбитальной системы**
   1. Решение с помощью аналитических формул
   2. Решение с помощью прямого моделирования движения спутников (оформить)
   3. Комбинированное решение с помощью аналитических формул и моделирования движения спутников (оформить)
6. **Задача анализа периодичности наблюдения широты или широтного пояса орбитальной системой (многоярусная конфигурация)**
   1. Решение с помощью аналитических формул
   2. Решение с помощью прямого моделирования движения спутников
   3. Комбинированное решение с помощью аналитических формул и моделирования движения спутников (оформить)
7. **Расчет параметров многоярусных спутниковых систем на нодально-синхронных орбитах (оформить)**
8. **Задача анализа периодичности наблюдения широты или широтного пояса одним спутником с нулевым фазовым состоянием**

Начальное фазовое положение спутника:

1. ***Выбор начальной точки отсчета***

Для решения задачи анализа периодичности широты или широтного пояса одиночного спутника определение начальной точки отсчета не является обязательной задачей, но для возможности правильного и согласованного проецирования полученных участков инвариантности и соответствующих им потоков наблюдения для каждого спутника всех ярусов спутниковой системы необходимо привязать начало первого участка инвариантности к единой точке на Земле. В результате данной процедуры полученные участки инвариантности спутников спутниковой системы будут отсчитываться от заранее выбранного положения, что позволит выполнить правильное слияние потоков наблюдения и соответственно определить периодичность обзора каждого участка инвариантности спутниковой системы.

Выберем начальной точкой отсчета точку с долготой Гринвича (λ = 0, )

1. ***Основные константы***
2. ***Коэффициент, характеризующие сжатие Земли***

= 0.0010827

1. ***Гравитационная постоянная Земли***
2. ***Полярное сжатие Земли***
3. ***Экваториальный радиус Земли***
4. ***Угловая скорость вращения Земли***

*=*

1. ***Параметры орбиты***

*m* *–* количество полных оборотов спутника за (количество витков)

*n* *–* количество полных оборотов Земли вокруг своей оси

*–* наклонение орбиты

*–* драконический период

*–* период повторяемости трассы

прецессия орбиты

радиус орбиты

высота круговой орбиты

1. ***Модель номинального движения спутников системы***
2. ***Средний радиус Земли***
3. ***Межузловое расстояние***
4. ***Межвитковое расстояние***
5. ***Драконический период***
6. ***Период повторяемости трассы***
7. ***Прецессия орбиты***
8. ***Радиус и высота орбиты***

Воспользуемся выражениями для *и* для решения уравнения

, где угловая скорость вращения Земли

Для этого введем переменную

Тогда подстановка формул для  *и* в данном уравнение приводит к следующему уравнению относительно неизвестной :

где , ,

Так как , то . Покажем, что при любом наклонение

уравнение имеет на интервале (0,1) ровно один корень. Это будет означать, что параметры и приведенные соотношения определяют средний радиус орбиты однозначно.

Для доказательства данного положения достаточно рассмотреть изменение левой части уравнения

в прямоугольнике

Интервалу кратностей [1. 33/2] соответствуют все практически важные орбиты: от геостационарной орбиты (m = n = 1) до самых низких орбиты с высотами 150…200 км (m/n = 33/2)

Таким образом, функция на интервале непрерывно убывает и меняет знак плюс на минус. А это и означает, что имеет на данном интервале единственный действительный корень.

Для определения этого корня можно воспользоваться одним из известных численных методов, например, методом Ньютона. При этом в качестве начального приближения целесообразно принять значение

где радиус круговой геосинхронной орбиты в центральном поле тяготения Земли, звездные сутки

Найденное таким образом значение непосредственно позволяет вычислить радиус нормальной орбиты и определить ее среднюю высоту.

В дальнейшем, говоря о круговой орбиты радиуса , будем понимать номинальную орбиту среднего радиуса .

1. ***Линейная ширина полосы обзора***

, где геоцентрическая угловая ширина

1. ***Исходные принципы наблюдаемости точек поверхности Земли***

Участок инвариантности – непрерывная дуга параллели максимальной величины, характеризующуюся тем, что любой ее точке соответствует один и тот же вариант наблюдения.

Базовой поток наблюдения – поток наблюдения, соответствующий потоку наблюдения любой точки участка инвариантности.

*Количество участков инвариантности: 1*

*Условие:*  ***(прямое наклонение) и*** ***(обратное наклонение),***

*Количество участков инвариантности: 2*

*Условие:*  ***(прямое наклонение) и*** ***(обратное наклонение),***

*Количество участков инвариантности: 4*

*Условие:*  ***(прямое наклонение),***

1. ***Полностью наблюдается***
2. ***Не наблюдается***
3. ***Экватор***
4. ***Полюс***
5. ***Верхние широты***
6. ***Нижние широты***
7. ***Захваты полосы при щелевых зонах обзора спутников***
8. ***Приведенное наклонение***
9. ***Полный захват***

1. ***Захваты для нижних широт***
2. ***Захваты для верхних широт***
3. ***Описание участков инвариантности в зависимости от типа наблюдения***
4. ***Экваториальный случай (1 участок инвариантности)***

*Условие:*

*Длина участка инвариантности:*

1. ***Полюс (1 участок инвариантности)***

*Условие:*

*Длина участка инвариантности:*

1. ***Верхние широты (2 участка инвариантности)***

Количество сеансов наблюдения и длины этих участков определяются следующим образом:

а) Необходимо вычислить захват полосы, захваты привязываем к вертексу орбиты:

б) Максимальное количество сеансов наблюдения: , где E – функция выделения целой части

в) Вычисляем остаток от деления полного захвата на межузловое расстояние:

Размер первого участка инвариантности: , количество сеансов:

Размер второго участка инвариантности: , количество сеансов:

1. ***Нижние широты (4 участка инвариантности)***

В этом случае спутник на широте своей полосой вырезает 2 захвата: на восходящем узле и на нисходящем, а количество участков инвариантности в каждом из захватов равно двум.

Суммарный захват полосы:

Максимальное количество сеансов наблюдения на каждом из участков: , где E – функция выделения целой части

1. ***Определение потока наблюдения через межузловое расстояние***
2. Определение потока наблюдения точки через межвитковое расстояние (

Пусть , где j = {1, k}, где k – количество сеансов наблюдения

Если , то необходимо увеличить данное значение на период повторяемости трассы . Полученное множество необходимо отсортировать в порядке не убывания. В результате данной операции получим базовый поток наблюдения через межвитковое расстояние

1. Определение необходимого количества витков для смещения на межузловых расстояний

Для определения потока наблюдения через можно использовать формулу для определения потока наблюдения через межвитковое расстояние. Необходимо итеративно вычислять поток наблюдения после каждого поворота до тех пор, пока значение долготы после поворота не станет равным искомому значению долготы после перехода черезмежузловых расстояний. Однако, можно вывести формулу для определения необходимого количества витков для смещения на межузловых расстояний, что позволит выполнить процедуру перехода и соответственно сортировку получившегося потока единожды.

Пусть – количество витков, необходимо для перехода на межузловых расстояний. Тогда , где m, n – соответственно количество витков и количество суток, – минимальное неотрицательное целое число, при котором – целое ( – 0, 1, 2, …). Знак перед определяется исходя из требования перехода на межузловых расстояний вперед (знак “-”) или назад (знак “+”).

Если при вычислении получается больше m, то из нее следует вычесть m необходимое число раз, чтобы полученное значение ∈ {1, m].

Зная необходимое количество витков, можно выполнить смещение потока наблюдения с помощью добавления к каждому моменту наблюдения .

Если в результате данного смещения момент наблюдения получается больше, чем период повторяемости трассы, то следует вычесть необходимое число раз, чтобы полученное значение момента наблюдения принадлежало [0, ).

1. ***Методика воспроизведения потока наблюдения по известному варианту наблюдения***

Последовательность времен пролета каждого спутника системы через любой свой широтный узел имеет вид , ,, где время первого пролета данного широтного узла, апериод повторяемости трассы спутника. Поэтому для воспроизведения потока наблюдений спутника достаточно сформировать времена пролета спутников через соответствующие данному варианту широтные узлы на временном интервале , и расположить их в порядке неубывания. Рассмотрим, как определяются времен пролета одного спутника системы через его одноименные широтные узлы, т. е. узлы одной из систем B, H, V. Для определенности будем считать данные узлы восходящими.

Пусть - номер витка, на котором спутник появляется в j-м восходящем узле. (При этом полагаем, что значению соответствует j = 1). Тогда для определения можно воспользоваться следующей формулой . Данная формула дает номер витка, на котором спутник появляется в j-м узле. Если при вычислении по формуле величина получается больше m, то их нее следует вычесть m необходимое число раз, чтобы полученное значение ∈ {1, m]. Имея номер витка, на котором спутник появляется в j-м восходящем узле, время его пролета через этот узел определяется по формуле . Где – драконический период обращения спутника. При этом время пролета через первый восходящий узел принимается равным нулю.

1. ***Определение базового потока наблюдения участков инвариантности для типов наблюдения: экватор, полюс***

Начальное фазовое положение спутника:

Длина участка инвариантности:

1. **Экваториальный случай**

Периодичность обзора τ =

1. **Полюс**

В данном случае для расчета базового потока наблюдения необходимо учесть начальный сдвиг по времени, равный времени полета спутника от нулевого фазового положения до полюса .

Периодичность обзора τ =

Зная периодичность обзора, то с учетом параметров орбиты и известным количеством сеансов наблюдения можно рассчитать базовый поток наблюдения.

1. ***Определение базовых потоков наблюдения на дуге от 0 до (верхние широты)***

В данном случае базовые потоки наблюдения будем рассчитывать с учетом полета спутника до самой высокой точки орбиты (вертекс орбиты).

Полученные базовые потоки наблюдения будут отличаться от базовых потоков наблюдения на участке [0, , поэтому необходимо выполнить процедуру проецирование полученной зоны [ на [0, , где середина зоны захватов будет равна: в случае когда и в противоположном.

Размеры и расположение участков инвариантности на всей широте будет таким же, как и на первом участке **[0,** . Потоки наблюдения с учетом временного сдвига при переходе от **[0,**  к **[,** могут быть рассчитаны по формулам перехода через межузловое расстояние.

**Алгоритм определения участков инвариантности, проецируя зону [ на [0,**

1. Вычисляем середину зоны захватов
2. Рассчитываем захваты для верхних широт
3. Рассчитываем параметры участков инвариантности ()
4. Находим долготу начала зоны захвата
5. Используя алгоритм воспроизведения потока наблюдения по известному варианту наблюдения восстанавливаем поток наблюдения участка по известному варианту наблюдения (количество сеансов: ) для первого участка инвариантности с учетом временного смещения, равного .
6. Используя алгоритм воспроизведения потока наблюдения по известному варианту наблюдения восстанавливаем поток наблюдения участка по известному варианту наблюдения (количество сеансов: ) для второго участка инвариантности с учетом временного смещения, равного .
7. На данном этапе необходимо выполнить проецирование участка [) на [0,
8. Определяем количество поворотовна против направления вращения Земли, чтобы значение долготы после поворота

стало , тогда**,** а, гдеE – функция выделения целой части

1. Совершаем повороты начала участка с долготой на величину раз в обратную сторону с вычислением базового потока после каждого перехода.

В результате этой операции получаем и )

1. Совершаем повороты начала участка с долготой на величину раз в обратную сторону с вычислением базового потока после каждого перехода.

В результате этой операции получаем и )

1. Если в результате поворотов , то размеры и начала участков инвариантности можно определить по следующим формулам:

* , где ) = )
* , где ) = )
* , где ) = )

1. Если , то размеры и начала участков инвариантности можно определить по следующим формулам:

* , где ) = )
* , где ) = )
* , где ) = )

1. ***Определение базовых потоков наблюдения на дуге от 0 до (нижние широты)***

Задачу определения базовых потоков наблюдения для нижних широт разобьем на две равносильные задачи, а именно: определение базовых потоков наблюдения для восходящего узла и определение базовых потоков наблюдения для нисходящего узла. После выполнения данных расчетов выполним операцию объединения и получим суммарные базовые потоки для широты на участке **[0,**

Рассчитывать базовые потоки наблюдения для восходящего узла и для нисходящего узла будем с учетом полета спутника до этих точек. Алгоритм определения начала зоны захвата будет зависеть от наклонения орбиты.

1. ***Определение начала участков зоны захвата для***

Определение времени полета спутника до восходящего узла и долготы подспутниковой точки в момент нахождения над рассматриваемой широтой

Определение времени полета спутника до нисходящего узла и долготы подспутниковой точки в момент нахождения над рассматриваемой широтой

Определение начала участков зоны захвата на восходящем и нисходящем узле

1. ***Определение начала участков зоны захвата для***

Рассчитаем размеры зоны захватов, используя формулы верхних широт, в результате получим значения:

Учитывая, что движение спутника происходит в противоположную сторону вращения Земли, то середина зоны захватов может быть определена следующим выражением

Определение начала участков зоны захвата на восходящем и нисходящем узле

где суммарный захват полосы, рассчитанный по формулам для нижних широт

Определение времен пролета спутника до нисходящего и восходящего узла

1. ***Определение базовых потоков наблюдения для восходящего узла***

Вычисление базовых потоков наблюдения для восходящего узла будем с помощью алгоритма, используемого для верхних широт. В результате получим множество с границами начала участков инвариантности и базовых потоков наблюдения этих участков на **[0,** для восходящего узла.

1. ***Определение базовых потоков наблюдения для нисходящего узла***

Вычисление базовых потоков наблюдения для нисходящего узла будем с помощью алгоритма, используемого для верхних широт. В результате получим множество с границами начала участков инвариантности и базовых потоков наблюдения этих участков на **[0,** для нисходящего узла.

1. ***Объединение полученных множеств для восходящего и нисходящего узлов***

Выполним объединение множеств и . Тогда

Пусть есть объединенная упорядоченная по не убыванию последовательность начала участков инвариантности.

Для определения базовых потоков наблюдения получившихся в результате объединения участков инвариантности необходимо определить долготы срединных точек этих участков:

Совокупный базовой поток наблюдения для срединной точки может быть найден с помощью определения между какими из границ массивов и лежит срединная точка и последующее объединение найденных базовых потоков наблюдения с упорядочиванием по не убыванию. Последовательное повторение последней операции позволяет определить количество сеансов наблюдения на каждом из участков инвариантности массива и сформировать базовые потоки наблюдения для каждого участка инварианта.

1. ***Решение задачи анализа с помощью прямого моделирования движения спутника (дописать)***

***Решением задачи анализа периодичности наблюдения широты или широтного пояса одним спутником с нулевым фазовым состоянием является массив , представляющий собой участки инвариантности, расположенные на [0, , а также соответствующие им потоки наблюдения.***

1. ***Задача анализа периодичности наблюдения любой точки Земли одиночным спутником с произвольным фазовым состоянием***

Начальное фазовое положение спутника:

Расположение точки на Земной поверхности: **,**

Для решения данной задачи в качестве исходных данных будем использовать алгоритм решения задачи анализа периодичности наблюдения широты или широтного пояса одиночным спутником с нулевым фазовым состоянием.

1. В результате решения задачи №1 получаем **,** где  **-** участки инвариантности, рассчитанные для спутника с нулевым фазовым состоянием
2. Определяем долготную проекцию точки на межузловое расстояние, а также временное смещение спутника относительно рассматриваемой точки
3. Угловое расстояние, которое должен пройти спутник для выхода на экватор
4. Угловая скорость изменения аргумента широты спутника
5. Время пролета спутника в момент выхода экватора
6. Угловая скорость изменения аргумента широты спутника
7. Изменение долготы восходящего узла за время пролета спутника до экватора
8. Определяем долготную разницу между спутником и точкой

Если значение долготной разницы получается меньше 0, то его необходимо увеличить на

1. Определяем необходимое количество межузловых расстояний для проецирования положения точки на **[0,**
2. Определяем необходимое количество витков для попадания точки в межузловое расстояние **[0,**

С помощью ранее описанного алгоритма определяем количество витков для проецирования положения точки на **[0,**

1. Определяем проекцию долготы точки на межузловое
2. Определение временного смещения
3. Определяем базовый участок инвариантности среди , в который попадает спроецированное положение рассматриваемой точки
4. Смещаем базовый аналитический поток наблюдения участка инвариантности на временное смещение
5. Определяем уточненный аналитический поток наблюдения (дописать)
6. Определяем поток наблюдения с помощью прямого моделирования (дописать)

***Решением задачи анализа периодичности наблюдения любой точки Земли одиночным спутником с произвольным фазовым состоянием является поток наблюдения***

1. ***Задача анализа периодичности наблюдения широты или широтного пояса ярусом орбитальной системы***

Для решения данной задачи воспользуемся алгоритмами, представленные в решениях задачи №1 и задачи №2.

Требование: спутники одного яруса должны иметь одинаковые значения полосы обзора, а также соответствующие орбитальные параметры (

1. В результате решения задачи №1 получаем **,** где  **-** участки инвариантности, рассчитанные с орбитальными параметрами яруса для нулевого фазового состояния
2. Выбираем первый спутник из яруса и выполняем проекцию его фазового положения на межузловое расстояние **[0,**
3. Угловое расстояние, которое должен пройти спутник для выхода на экватор
4. Угловая скорость изменения аргумента широты спутника
5. Время пролета спутника в момент выхода экватора
6. Угловая скорость изменения аргумента широты спутника
7. Изменение долготы восходящего узла за время пролета спутника до экватора
8. Определяем проекцию спутника на межузловое расстояние
9. Берем границы начала базовых участков инвариантности, рассчитанных для нулевого фазового положения, и прибавляем получившееся значение проекции спутника.

, где номер начала участка инвариантности, номер спутника яруса

Если значение получается больше, чем , то из него следует вычесть , чтобы полученное значение принадлежало **[0, .** Получившееся значение складываем в массив

1. Выполняем шаг 2 для каждого спутника исследуемого яруса
2. Сортируем массивпо не убыванию
3. Добавляем 0 и границу межузлового расстояния в массив
4. Берем середину первого участка из массива и рассчитываем суммарный поток наблюдения от каждого спутника
5. Рассчитаем середину первого участка инвариантности по следующей формуле

**,** где – количество спроецированных границ каждого спутника в массиве

1. Определяем долготную проекцию точки (**)** на межузловое расстояние, а также временное смещение спутника ( относительно рассматриваемой точки, где в качестве рассматриваемой точки выбирается середина первого участка инвариантности . Для определения и воспользуемся алгоритмом, представленным в решении задачи №2. В результате получим смещенный поток наблюдения для точки
2. Выполняем шаг 2 для каждого спутника яруса и объединяем получившиеся потоки наблюдения, сортируя моменты наблюдения по не убыванию. В результате получаем участок инвариантности и соответствующий ему объединенный поток наблюдения
3. Выполняем пункт 6 для каждого участка инвариантности из массива границ

***Решением задача анализа периодичности наблюдения широты или широтного пояса ярусом орбитальной системы является массив, представляющий собой участки инвариантности, расположенные на [0, , а также соответствующие им потоки наблюдения.***

1. ***Задача анализа периодичности наблюдения широты или широтного пояса орбитальной системы (многоярусная конфигурация)***

Для решения данной задачи воспользуемся алгоритмами, представленные в решениях задачи №1, задачи №2, задачи №3. Также необходимо рассчитать параметры орбитальной системы, а именно протяженность долготы , на которой анализируются участки инвариантности и период повторяемости орбитальной системы с учетом, что скорости прецессии восходящих узлов на всех ярусах одинаковы.

1. Определяем период повторяемости спутниковой системы , определив наименьший общий делитель количества суток всех ярусов системы
2. Определяем анализируемую протяженности долготы , определив наименьший общий делитель количества витков всех ярусов системы
3. Для каждого яруса рассчитываем базовые участки инвариантности, используя алгоритм, представленный в задаче №1, и получаем множество {**,** где N – количество ярусов орбитальной системы, а участки инвариантности, рассчитанные с орбитальными параметрами z-ого яруса для нулевого фазового состояния.

Выбираем первый спутник первого яруса и проецируем его фазовое положение на межузловое расстояние, используя алгоритм, представленный в задаче №3. В результате данной операции получаем проекцию фазового положения спутника на межузловое расстояние яруса. Дальше необходимо найти проекции полученного значения на анализируемой протяженности долготы. Для этого определяем сколько межузловых расстояний данного яруса содержится в анализируемом участки долготы орбитальной системы с помощью следующей формулы . Берем границы начала участков инвариантности, рассчитанных для нулевого фазового положения, и прибавляем получившееся значение проекции спутника: , где номер начала участка инвариантности, номер спутника яруса, . Если значение получается больше, чем , то из него следует вычесть , чтобы полученное значение принадлежало **[0, .** Получившееся значение складываем в массив

1. Выполняем шаг 3 для каждого спутника, каждого яруса
2. Добавляем 0 и значение анализируемой долготы системы
3. Сортируем массивпо не убыванию
4. Берем середину первого участка из массива и рассчитываем суммарный поток наблюдения от каждого спутника
5. Рассчитаем середину первого участка инвариантности по следующей формуле

**,** где – количество спроецированных границ каждого спутника в массиве

1. Определяем долготную проекцию точки (**)** на межузловое расстояние, а также временное смещение спутника ( относительно рассматриваемой точки, где в качестве рассматриваемой точки выбирается середина первого участка инвариантности . Для определения и воспользуемся алгоритмом, представленным в решении задачи №2. В результате получим смещенный поток наблюдения для точки
2. Полученный поток наблюдения необходимо растянуть раз, путем добавления моментов наблюдения в увеличенных на **,** где
3. Выполняем шаг 2 и шаг 3 для каждого спутника каждого яруса и объединяем получившиеся потоки наблюдения, сортируя моменты наблюдения по не убыванию. В результате получаем участок инвариантности и соответствующий ему объединенный поток наблюдения
4. Выполняем пункт 7 для каждого участка инвариантности из массива границ
5. ***Решением задача анализа периодичности наблюдения широты или широтного пояса орбитальной системы (многоярусная конфигурация)***

***является массив, представляющий собой участки инвариантности, расположенные на [0, , а также соответствующие им потоки наблюдения.***