



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»**

Факультет управления на воздушном транспорте  
Кафедра № 8

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

Бакалаврская работа  
бакалаврская работа, дипломная работа (проект)  
**(пояснительная записка)**

**Тема:** Моделирование космического сегмента спутниковой навигационной системы

**«В Государственную  
экзаменационную комиссию»**

**Заведующий выпускающей кафедрой**

К.Т.Н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)  
Земсков Ю. В.  
(подпись) (фамилия, и.о.)

**Исполнитель:**  
Дианов И. П.  
(подпись) (фамилия, и.о.)

**Руководитель:**  
К.Т.Н., доцент  
(должность, ученая степень, звание)  
Зубакин И. А.  
(подпись) (фамилия, и.о.)

Санкт-Петербург  
2022 г.

## Аннотация

Целью представленной выпускной квалификационной работы является исследование различных конфигураций спутниковых навигационных систем (СНС) и проведение сравнительного анализа их эффективности. Конфигурация СНС – это взаимное расположение спутников навигационной системы в пространстве.

Новизна бакалаврской работы заключается в использовании предложенного мной коэффициента для оценки эффективности СНС.

Проведенное исследование позволяет сделать выводы, что существующие глобальные системы не только позволяют оперативно определять местоположение пользователя в любой момент времени, в любой точке на Земле и высоко над Землей, но и делают это почти максимально эффективно.

Полученные результаты в виде программы-симулятора и исследования могут использоваться в научной области для изучения и моделирования СНС, а также в области образования для проведения лабораторных или практических работ и демонстрации работы СНС.

*Ключевые слова:* спутниковая навигация, конфигурация, моделирование.

Количество страниц – 62

Рисунков – 39

Таблиц – 2

Формул – 2

## **Перечень сокращений и обозначений**

АП – аппаратура потребителя

ВД – воздушное движение

ВС – воздушное судно

ВП – воздушное пространство

ГА – гражданская авиация

ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система

ДМ – дифференциальный метод

ДПС – дифференциальная подсистема

ДР – дифференциальный режим

ИКАО – международная организация гражданской авиации

ИСЗ – искусственный спутник Земли

КИ – корректирующая информация

КИК – командно-измерительный комплекс

ККС – контрольно-корректирующая станция

НВО – навигационно-временное обеспечение

НИСЗ – навигационный искусственный спутник Земли

НКА – навигационный космический аппарат

ОрВД – организация воздушного движения

ОТО – общая теория относительности

П – потребитель

РЛС – радиолокационная станция

РНП – радионавигационные параметры

РНС – радионавигационная система

СНС – спутниковая навигационная система

СПС – система предупреждения столкновений

СТО – специальная теория относительности

УВД – управление воздушным движением

ЦУ – центр управления

ШВ – шкала времени

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ATM – air traffic management

C/A – clear acquisition

CNS – communication, navigation, surveillance

ECMA - european computer manufacturers association

FANS – future air navigation system

GPS – global positioning system

ICAO – international civil aviation organization

IEC – international electrotechnical commission

ISO – international organization for standardization

LINQ – language integrated query

RNAV – area navigation

UTC – universal time coordinated

XML – extensible markup language

## Содержание

<b>Введение .....</b>	<b>6</b>
<b>1 Использование СНС в ГА.....</b>	<b>9</b>
1.1 Общие сведения об СНС .....	9
1.2 Принципы построения и особенности СНС.....	16
1.3 Использование СНС в ГА .....	17
1.4 Дифференциальный режим СНС .....	23
1.5 Основные задачи при комплексном проектировании СНС.....	26
1.6 Расчет релятивистских эффектов в СНС .....	30
<b>2 Моделирование СНС .....</b>	<b>33</b>
2.1 Постановка цели и задач для исследования .....	33
2.2 Создание программы .....	35
2.3 Среда разработки .....	35
2.4 Модель гравитации .....	39
2.5 Модель радиоконуса .....	40
2.6 Модель детектора сигналов .....	43
2.7 Сбор данных и расположение детекторов.....	44
2.8 Моделирование орбит и расположение спутников .....	46
2.9 Моделирование существующих СНС .....	48
2.10 Определение зоны радиопокрытия .....	52
2.11 Исследование других конфигураций .....	53
2.12 Внедрение в учебный процесс .....	57
<b>Заключение .....</b>	<b>61</b>
<b>Список использованных источников .....</b>	<b>62</b>
<b>Приложение А – Моделирование гравитации .....</b>	<b>63</b>
<b>Приложение Б – Моделирование радиоконуса .....</b>	<b>64</b>
<b>Приложение В – Моделирование детектора сигналов .....</b>	<b>66</b>
<b>Приложение Г – Сбор данных и расположение детекторов .....</b>	<b>67</b>
<b>Приложение Д – Моделирование орбит и расположение спутников .....</b>	<b>69</b>

## Введение

Спутниковая навигация – это современный, прогрессивно развивающийся сегмент технологий. Это одна из первых космических отраслей, созданная и запущенная не только для исследований и сбора данных, а для решения конкретных проблем и задач навигации на Земле. Первые рациональные улучшения при использовании спутниковых навигационных систем можно было увидеть в судоходстве – благодаря более точному ориентированию и соблюдению маршрута движения морские суда стали экономить больше топлива и времени, а в масштабах всех кораблей эффективность настолько возросла, что установка бортовой аппаратуры потребителей окупалась уже после года эксплуатации. Обнаружение терпящих бедствие также стало основываться на спутниковых технологиях.

В СНС (спутниковая навигационная система) первого поколения вокруг Земли размещалось шесть НИСЗ (навигационный искусственный спутник Земли) на независимых орбитах на расстоянии тысяча километров от поверхности Земли. При такой структуре системы, сеансы связи с потребителем могут проводиться в среднем раз в полтора часа с продолжительностью 10-16 минут. С такими условиями определение своих координат не будет доступно потребителю в любой момент времени, не будет оперативным, а значит и их точность в среднем будет ниже.

Для устранения этих недостатков, расширения системы и зон покрытия системой, была создана СНС второго поколения, в которой учитывались требования оперативности, непрерывности – возможность выдачи актуальной информации в каждый момент времени.

Последующее развитие спутниковой навигации связано с определением полного вектора состояния (трех составляющих координат и скорости в пространстве) различными способами и нахождением оптимального.

При использовании пассивного метода определения дальности, когда потребитель принимает данные, на основе которых сможет вычислить свое

местоположение, нужно также определять смещение временной шкалы на борту. А для увеличения точности доплеровских измерений – смещение опорной частоты на борту. Поэтому итоговое число находимых параметров возрастает с 6 до 8. Для нахождения навигационных параметров необходима одновременная видимость как минимум четырех спутников, поэтому при проектировании СНС рассматривались такие конфигурации, при которых будет обеспечено полное четырехкратное покрытие земной поверхности зонами видимости спутников.

В наши дни спутники сосредоточились на орбитах средней высоты. На таких орбитах имеется обширная зона видимости и возможность выполнять радиально-скоростные измерения. Также выполняется новая техническая идея – координация пространственного расположения НИСЗ и излучаемых сигналов по времени, частоте или коду. Созданные СНС второго поколения независимо в СССР («Глонасс») и США («Навстар») оказались достаточно близки, что стало предпосылкой для совместного использования в будущем. Основные свойства СНС определяются пространственным построением и расположением, высоким показателем стабильности эталонов частоты на борту, выбором сигналов и методов их обработки, а также выбором методов устранения и компенсации различных ошибок.

Сетевые СНС 2-го поколения функционируют непрерывно и глобально, обеспечивая определение вектора полного состояния Потребителя с высокой точностью. Спутниковая сеть состоит из 18-24 НКА, координированно вращающихся по круговым или эллиптическим орбитам с расстоянием от Земли около 20 000 километров (орбитальный период 12 часов). Орбиты лежат в 3-6 пересекающихся плоскостях с наклоном 55-65°; на каждой орбите равномерно расположены 3-8 НКА. Координаты определяются по измерениям дальности, а скорости – по доплеровскому сдвигу. Параметры системы рассчитаны таким образом, что точность позиционирования достигает 10 метров, а скорости – 0,05 м/с [5, с. 7].

Целью представленной выпускной квалификационной работы является исследование различных конфигураций спутниковых навигационных систем (СНС) и проведение сравнительного анализа их эффективности. Для достижения этой цели необходимо решить такие задачи:

- 1) изучить научно-техническую литературу по теме спутниковых навигационных систем;
- 2) разработать программу-симулятор СНС с гибко настраиваемыми параметрами;
- 3) смоделировать существующие СНС разных стран;
- 4) определить зону радиопокрытия и эффективность спутниковой группировки;
- 5) исследовать другие возможные конфигурации спутников;
- 6) подтвердить эффективность существующих СНС или предложить новую.



# 1 Использование СНС в ГА

## 1.1 Общие сведения об СНС

В СНС роль опорных радионавигационных точек выполняют ИСЗ с установленным оборудованием. При переходе от неподвижных точек к вращающимся по орбитам появляется несколько дополнительных звеньев: космодром, система НИСЗ, аппаратура Потребителя, Командно-измерительный комплекс (КИК) и центр управления (ЦУ).

Задача космодрома – вывод спутников на заданные орбиты как при начальном развертывании, так и при периодическом пополнении в случае выхода из строя; сопутствующая сборка, хранение, транспортировка, испытания, заправка и т.д.

Системой НИСЗ называется совокупность источников навигационных сигналов, содержащих разную служебную информацию. На борту устанавливается такое оборудование, как средства пространственной стабилизации, аппаратура траекторных измерений, система телеметрии, аппаратура командного и программного управления, системы электропитания и терморегулирования, бортовой высокоточный эталон времени и бортовой компьютер.

Аппаратура потребителя принимает сигналы от НИСЗ, измеряет навигационные параметры и обрабатывает измерения. Основными навигационными функциями будут зависимости, определяющие  $r$  и  $\dot{r}$ . Движение НИСЗ и Потребителя удобно описывать в геоцентрической экваториальной системе. Если задать такую систему координат  $XYZ$  и координаты НИСЗ и П обозначить соответственно  $x_c, y_c, z_c$  и  $x, y, z$ , то расстояние между ними выразится как:

$$r = \sqrt{(x_c - x)^2 + (y_c - y)^2 + (z_c - z)^2}.$$

Радиальная скорость может быть найдена путем дифференцирования расстояния  $r$  по времени:

$$\dot{r} = r^{-1}[(x_c - x)(\dot{x}_c - \dot{x}) + (y_c - y)(\dot{y}_c - \dot{y}) + (z_c - z)(\dot{z}_c - \dot{z})].$$

КИК снабжает спутники служебной информацией, контролирует состояние, управляет движением, сверяет и согласовывает бортовые и наземные шкалы времени, снабжает Потребителя эфемеридной информацией.

Центр управления координирует функционирование всех элементов.

Структурная схема СНС GPS (рис. 1):



Рисунок 1 – Структура СНС «Навстар»

Глобальная система постоянного действия и мгновенных навигационных определений – сетевая СНС – основывается на сети спутников, скоординированной по излучению сигналов и движению. Преимущества СНС:

- Неограниченная дальность действия в приземном слое.
- Высокоточное определение координат и скорости во всей рабочей области.
- Навигационные определения выдаются в единой системе координат однозначно для всех потребителей.
- Точность не зависит от времени суток, сезонов года и погодных условий.
- Высокая устойчивость к помехам.
- Неограниченное число потребителей.

- Возможность использовать аппаратуру разных классов точности и определять разные параметры в одном и том же радиополе.

Эти системы не только глобальны, но и универсальны, их применение возможно при:

- Вождении любого рода подвижных объектов.
- Управлении воздушным движением и морскими судами.
- Обеспечение безопасности полетов, предотвращение столкновений.
- Заход и посадка воздушных судов на аэродромы.
- Проведение операций по поиску и спасанию.
- Географическая привязка гидрометеорологических буев.
- Рыболовная деятельность.
- Геологические работы на прибрежном шельфе и т.д.

Помимо прикладных задач, получаемую информацию с таких систем можно использовать для научных исследований, решению фундаментальных научных проблем, например, в области геодинамики.

По высоте орбиты СНС делятся на низко-, средне- и высокоорбитные. На низких орбитах (1000 км над Землей) время обращения (105 минут) и угловой радиус зоны радиовидимости ( $25^\circ$ ) одним спутником малы, а скорость относительного движения НИСЗ и П наибольшая. На таких системах возможны как координатные, так и скоростные измерения, но для полного покрытия понадобится большее количество спутников. На высоких орбитах характерны стационарные (около 36100 км), на которых экваториальные спутники будут неподвижны относительно земной поверхности, имея угловой радиус зоны радиовидимости  $\sim 75^\circ$ , что потребует самое меньшее количество спутников, но скоростные измерения применяться не смогут. Средневысокие орбиты (14-20 тысяч км) с периодом обращения 8-12 ч и радиусом зоны  $65-70^\circ$  на данный момент являются золотой серединой по необходимому количеству

спутников, обеспечиваемой точности скоростных и координатных определений [5, с. 16].

Поскольку в сетевых СНС измерения проводятся одновременно по нескольким спутникам, Потребитель должен выбрать оптимальное созвездие из имеющегося количества над радиогоризонтом. Для этого ему нужно иметь априорную информацию о расположении и движении всех НИСЗ системы. Каждый НИСЗ транслирует не только свои эфемериды, но и всех остальных спутников системы. Эта информация называется эфемеридами второго рода или альманахом, она нужна уже не для расчетов положения, а для определения и выбора НИСЗ, с которым потребитель войдет в связь, поэтому требования точности к информации в альманахе понижены.

СНС работает в собственном системном времени, все процессы протекают по этой единой шкале. Периодически локальные временные шкалы принудительно согласовываются и синхронизируются с системной шкалой. Требования высокой точности связаны с выбранным способом определения расстояния – применением пассивного дальномера с хранением начала отсчета. По бортовой шкале одновременно измеряются псевдодальности до нескольких НИСЗ, поэтому нужно, чтобы их временные шкалы были согласованы, это достигается привязкой каждой из них к общему единому системному времени. При измерении псевдодальности погрешность из-за смещения временной шкалы входит в погрешность измерений. Чтобы она не превышала 0,3 м, смещение должно оставаться в пределах 1 нс. Если принять, что период синхронизации равен 12 часам, то для хранения системного времени на борту потребуется генератор со стабильностью:

$$\frac{10^{-9}}{1 * 60 * 60 * 12} \approx 2 * 10^{-14} \text{ с.}$$

Требования к стабильности можно понижать путем уменьшения интервалов между сеансами синхронизации или прогнозированием ухода частоты генераторов на спутниках. В сеансе навигационных определений происходит синхронизация шкалы времени потребителя, когда вместе с

координатами и скоростью. По оценивается разность фазы бортового генератора с фазой генераторов НИСЗ. Поэтому СНС также являются глобальными системами единого времени.

Системная шкала задается координационным центром, где ее хранит главный синхронизатор системы. Этот наземный хранитель имеет точность бо́льшую, чем на борту спутников. У системного времени может быть расхождение со всемирным, подстраивать шкалу под него уже необязательно, достаточно знать и указывать величину расхождения в каждом кадре навигационного сигнала.

**Сеть НИСЗ** выбирается по критериям кратности глобального покрытия зонами видимости, точности местоопределения, минимальной взаимной интерференции сигналов. Обращая внимание на последний критерий, можно задуматься, что больше – не всегда значит лучше, и при большом количестве спутников потребовалось бы решать задачу разбора и выделения сигналов из того «шума», производимого излучением множества соседних спутников. Для СНС второго поколения одной из самых выгодных конфигураций признана система из 24 НИЗС, размещенных равномерно в трех плоскостях, наклоненных на  $63^\circ$  к экваториальной плоскости и разнесенных по долготе на  $120^\circ$ , на круговых орбитах, высотой около 20 000 км [5, с. 22].

Все НИСЗ сети излучают сигналы одинаковой структуры, различается лишь содержание передаваемой служебной информации: индивидуальные частотно-временные поправки, эфемериды, альманах, телеметрическая информация, ключевые слова, поправки на распространение радиоволн и другая информация, повышающая точность и надежность решения навигационной задачи. Вся информация комбинируется в определенном порядке в виде кадра, состоящего из строк, и передается с известной периодичностью.

Универсальная СНС должна обеспечивать как гражданских П, так и военных. В таком случае понадобится разделение доступа к сигналам: для военных – сигналы с предельной точностью, доступные по специальному

пароллю; для гражданских – легкодоступные сигналы с приемлемой погрешностью. В «GPS (Navstar)» для этого предусмотрено кодовое разделение сигналов: код P (Protected – защищенный) и C/A (Clear Acquisition – легко обнаруживаемый).

**Навигационный сигнал.** В системе «Глонасс» используется частотный способ разделения сигналов. Сигналы спутников идентифицируются по значению номинала их несущей частоты, лежащей в отведенной полосе частот. Предусмотрены две частотные полосы ( $j = 1, 2$ ) в диапазонах  $L_1$  и  $L_2$ . Номиналы частот формируются по общему правилу:

$$f_{ji} = f_{j0} + i\Delta f_i,$$

где  $f_{ji}$  – номиналы литерных частот,  $f_{j0}$  – первая литерная частота,  $\Delta f_i$  – интервал между литерными частотами,  $i = 0, 1, 2, \dots, 24$  – номера литеров в каждом из диапазонов. Для частот вблизи 1600 МГц (диапазон  $L_1$ ):

$$f_{10} = 1602 \text{ МГц}, \Delta f_1 = 0,5625 \text{ МГц}.$$

Для частот вблизи 1240 МГц (диапазон  $L_2$ ):

$$f_{20} = 1246 \text{ МГц}, \Delta f_2 = 0,4375 \text{ МГц}.$$

Литер  $i = 0$  не предназначен для потребителей и используется для проверки резервных НИСЗ при пополнении орбитальной группировки. Распределение остальных литерных частот среди функционирующих НИСЗ задается альманахом, передаваемым в кадре служебной информации. Так, частотная полоса рабочих сигналов системы в диапазоне  $L_1$  составит 1602,5625...1615,5 МГц, а частотная полоса в диапазоне  $L_2$  – 1246,4375...1256,9375 МГц.

Каждый НИСЗ системы «Глонасс» излучает радиосигналы в обоих диапазонах для реализации двухчастотного способа излучения ионосферной погрешности измерений навигационных параметров. Для когерентности этих сигналов они формируются от общего эталонного генератора с соблюдением отношения рабочих частот:

$$\frac{f_{2i}}{f_{1i}} = \frac{7}{9}.$$

Служебная информация содержит оперативную и неоперативную часть. Оперативная относится к характеристикам того спутника, в сигнал которого она заложена; неоперативная – к характеристикам системы в целом.

Оперативная информация содержит:

- эфемериды спутника – три координаты, три составляющие скорости и ускорения, вызванные притяжением Солнца и Луны, в определенный момент времени;
- оцифровку меток времени спутника;
- сдвиг шкалы времени спутника относительно шкалы времени системы;
- относительное отличие несущей частоты излучаемого радиосигнала от опорной частоты центрального хранителя времени.

Неоперативную информацию образует альманах системы, содержащий:

- параметры орбит всех спутников системы;
- округленные значения сдвигов шкалы времени каждого спутника относительно шкалы времени системы;
- поправки к шкале времени относительно шкалы UTC;
- признак работоспособности всех 24 спутников системы.

Полный объем оперативной и неоперативной информации скомпонован в виде суперкадра длительностью 2,5 мин. Суперкадр состоит из 5 кадров по 30 с каждый, каждый кадр содержит 15 строк. Длительность строки 2 с: первые 85 двоичных единиц, занимающие 1,7 с, отведены для передачи цифровой информации, и оставшиеся 0,3 с, предоставлены для передачи метки времени.

Принимая один суперкадр по сигналу какого-либо спутника, можно собрать полный объем альманаха за 2,5 минуты [5, с. 30].

**Аппаратурой потребителей** системы «Глонасс» в навигационном сеансе проводятся беззапросные измерения псевдодальности и радиальной псевдоскорости минимум до четырех НИСЗ, в зависимости от числа каналов

прием сигналов проводится либо одновременно, либо последовательно во времени. По результатам измерения радионавигационных параметров и по извлеченной из кадра служебной информации определяются пространственные координаты П, составляющие его скорости и поправка местной шкалы времени к системной «Глонасс».

Для повышения оперативности и достоверности информации для потребителей существуют дополнительные каналы снабжения сведениями – информационные центры на земле, которые передают:

- текущее техническое состояние спутников системы;
- запланированные сроки службы (будущее состояние) спутников;
- данные альманаха для предсказания навигационных сеансов.

## **1.2 Принципы построения и особенности СНС**

Условие одновременной работы нескольких НИСЗ – излучателей сигналов в сетевой пассивной СНС предъявляет специфические требования к передаче радионавигационных сигналов. В каждой точке околоземного пространства формируется групповой радионавигационный сигнал, представляющий собой сумму сигналов от нескольких НИСЗ. Образование группового сигнала можно рассматривать как операцию уплотнения радиоканала многоспутниковой РНС. В приемнике потребителя осуществляется обратная операция – из группового сигнала выделяются сигналы отдельных НИСЗ – то есть разделение сигналов.

**Пространственная селекция** предполагает разделение излучений от различных НИСЗ с помощью установки у потребителя остронаправленных антенн с шириной луча в единицы и доли градуса. Размещение таких антенн на движущихся объектах не всегда возможно, поэтому для широкого применения этот способ не подойдет. Но можно успешно использовать на неподвижных, например, в Наземном центре навигации. Помимо решения задачи селекции, этот способ существенно повышает энергетический потенциал радиолинии.



**Временная селекция** обеспечивается неперекрывающимися между собой во времени импульсами, при этом форма сигналов и их спектры от различных НИСЗ могут полностью совпадать. Излучению каждого НИСЗ при временном разделении отводится определенное временное окно, отделяющегося от предыдущего защитным интервалом.

**Частотная селекция** – за счет разнесения частот сигналов различных НИСЗ мы сможем разделять групповой сигнал с помощью, например, полосового фильтра. При этом сигналы всех НИСЗ могут спокойно передаваться одновременно с одинаковой временной структурой. При разделении полосы частот на промежутки для каждого спутника также применяются защитные частотные интервалы, чтобы не путать сигналы с искаженной частотой, вызванной эффектом Доплера.

**Структурная селекция (кодовое разделение)** – все сигналы передаются одновременно в общей полосе частот, а для разделения сигналов при приеме используются особенности их формы, структуры, например, различия кодов.

В СНС в различных точках ее зоны действия потребитель может видеть разное число НИСЗ, превышающее минимальное, необходимое ему для навигационных определений. Проводя навигационное определение по всем НИСЗ, находящимся в зоне его радиовидимости при наличии случайных погрешностей, П будет получать наивысшую возможную точность. Естественно предполагать, что чем больше число НИСЗ доступно для П, тем выше будет точность навигационных определений. Но также существенную роль играет не только число видимых НИСЗ, но и конфигурация наблюдаемого их созвездия.

### **1.3 Использование СНС в ГА**

Развитие радионавигационных средств на протяжении всей истории их существования неизменно стимулировалось расширением области применения и усложнением задач, возлагавшихся на них, и прежде всего

ростом требований к их дальности действия и точности. Если в первые десятилетия радионавигационные системы обслуживали морские корабли и самолеты, то затем состав их потребителей значительно расширился и в настоящее время охватывает все категории подвижных объектов, принадлежащих различным ведомствам. Если для первых РНС – амплитудных радиомаяков и радиопеленгаторов – была достаточна дальность действия в несколько сотен километров, то затем постепенно требования к дальности возросли до 1...2,5 тыс. км (для внутриконтинентальной навигации), до 8...10 тыс. км (для межконтинентальной) и, наконец, превратились в требования глобального навигационного обеспечения. Что касается точности, то поначалу устраивала точность в несколько километров, затем оказалось возможным реализовать точности в сотни метров и, наконец, с появлением технических возможностей для создания сетевых СНС удалось удовлетворить требованиям на уровне десятка метров. Дальше потребуются уже дециметровые и сантиметровые точности.

Сетевые спутниковые РНС разрабатывались прежде всего для обеспечения навигационных потребностей таких подвижных объектов, как самолеты и корабли. Их основная задача – определение координат, производных от координат и навигационных элементов движения.

Текущие координаты навигационных ИСЗ задаются в геоцентрической прямоугольной системе координат, а по результатам навигационных измерений положение объекта привязывается к ИСЗ, поэтому наиболее естественно определять искомые координаты в той же геоцентрической прямоугольной системе. Таким образом формулируется первичная координатная задача. В то же время потребителей могут интересовать другие формы координат, те, которыми они пользуются в своем процессе навигации: географические, прямоугольные Гаусса-Крюгера, ортодромические, относительные. И АП должна иметь возможность выдавать координаты в любой необходимой форме.

**В области гражданской авиации** на спутниковых технологиях основываются целые концепции развития CNS/ATM ICAO и RNAV (зональная навигация) [1, с. 48]. По сравнению с измерителями радиотехнического и инерциального типа СНС обладают рядом преимуществ. Спутниковые системы значительно меньше подвержены влиянию помех, вызванных аномалиями распространения и переотражениями, влиянием рельефа местности. СНС имеют высокие характеристики надежности, готовности, целостности и непрерывности, недостижимые для систем других типов. Важные свойства – универсальность (возможность использования на всех этапах полета), доступность (оперативный выбор периодичности измерений), высокая точность и информативность. СНС позволяет определить не только местоположение ВС, включая высоту, но и параметры его движения (путевую и вертикальную скорость, значения ускорений и путевой угол). В то же время недостатки радиолокаторов следующие:

- Зона действия РЛС ограничивается прямой видимостью;
- существуют «мертвые зоны»: на низких высотах до земной поверхности и конусное пространство над РЛС;
- антенны имеют боковые и задние лепестки диаграммы направленности, вызывающие появление ложных меток;
- вращение антенны, как и частота обновления информации, происходит с большим периодом. Погрешности измерения координат растут с увеличением дальности, так что точность определения невысока;
- обслуживание сетей воздушных трасс большого размера требует соответствующего радиополя. Часто оптимальная расстановка РЛС оказывается недоступна по разным причинам (географическим, экологическим, техническим);
- современные типы локаторов достигли предела совершенства и дальнейшее их улучшение дается высокой ценой;

- радиолокатор является довольно дорогостоящим решением аэронавигационного обеспечения как по себестоимости, так и по затратам на установку, подведение коммуникаций, техобслуживание, ремонт.

Продолжение концепции радиолокационного контроля является экстенсивным путем развития. Интенсивный путь – предложение новой стратегии – часто бывает более эффективным.

Таким образом, специальный комитет FANS международной организации гражданской авиации ИКАО в 1988 году представил новую концепцию развития систем связи, навигации и наблюдения (CNS), основанную на спутниковых технологиях. Эти нововведения при их реализации в полной мере должны неизбежно изменить в глобальном масштабе систему организации воздушного пространства (ATM). В связи с этим глобальный план ИКАО для систем связи, навигации и наблюдения/регулирования воздушного движения был назван CNS/ATM.

**Общая характеристика стратегии.** По прогнозам ИКАО, в ближайшие два десятилетия ожидается двукратный рост объема авиаперевозок в европейском регионе (включая исландское и океанические воздушные пространства) [1, с. 51].

При старых средствах связи, навигации, наблюдения и оповещения ряд крупных аэропортов уже в наше время оказываются перегруженными даже в нормальных условиях, не говоря уже о нестандартных ситуациях, связанных, например, с неблагоприятными метеорологическими условиями. В результате увеличиваются задержки вылета и прилета, нарушается регулярность и, как следствие, снижается экономичность перевозок, возрастает степень неблагоприятного влияния на экологию. В основу новой стратегии положены такие принципы, как:

- полнота: новую организацию и управление необходимо применять для всех этапов полета (руление, взлет, полет по маршруту, заход на посадку, посадка и послепосадочное руление),

а также для наземных процессов, связанных с подготовкой и обеспечением полетов;

- единство: стратегия направлена на удовлетворение потребностей всех пользователей воздушного пространства (включая пассажирские и грузовые перевозки, чартерные и спецрейсы, полеты военной авиации);
- однородность: переход на новые технологии должен осуществляться планомерно и последовательно органами ОрВД всех стран-участников в соответствии с глобальной программой ИКАО.

Стратегия предусматривает следующие инициативы:

- организацию и управление движением в воздушном пространстве без национальных границ и на всех этапах полета;
- разработку и применение новых единых стандартов, правил и практики безопасности;
- создание структуры, обеспечивающей применение общих эффективных правил, регулирующих предоставление услуг ОрВД всеми государствами;
- экономически эффективную ОрВД, предоставляющую услуги пользователям ВП и максимально удовлетворяющих их требованиям;
- повышение производительности органов УВД с учетом человеческого фактора;
- снижение расходов на ОрВД за счет применения новых информационных технологий и технических средств, оптимизации структуры и процедур предоставления услуг пользователям ВП;
- повышение пропускной способности ВП и аэропортов, элементов единой транспортной сети;

- организацию принятия решений на основе новых информационных технологий для всех участников ВД;
- оценку и снижение степени влияния на окружающую среду;
- меры по дальнейшему улучшению взаимодействия между военными и гражданскими органами ОрВД.

В недавнем прошлом диспетчеру, имеющему в своем распоряжении современный локатор, положение ВС зачастую было известно точнее, чем его экипажу. Такое положение дел радикально изменилось с вводом в эксплуатацию СНС второго поколения, таких как «Navstar» и «Глонасс». При установке на ВС навигационного приемника такой системы у экипажа появляется возможность определять собственное местоположение с точностью 30 м каждую секунду, а при наличии вблизи ВС станции дифференциальных поправок эта точность может быть значительно повышена. При сопряжении с инерциальной системой навигации появляется возможность узнавать свои координаты не просто каждую секунду, а практически непрерывно. Это возможно, если экстраполировать данные с инерциальной системы, которая в свою очередь будет корректировать свое начало отсчета при получении очередных координат со спутника, при условии, что они не содержат аномально большой погрешности, иначе такие данные будут приниматься как искаженные и неправильные и игнорироваться.

Таким образом, с появлением СНС положение ВС стало лучше определяться его бортовым навигационным комплексом, чем наземными средствами наблюдения, которыми располагает диспетчер. В связи с этим появилась идея передавать данные о местоположении с борта ВС на землю, снабжая авиадиспетчера высокоточной и оперативной информацией о воздушной обстановке.

При успешной организации надежного и устойчивого цифрового канала связи возможна трансляция не только координат, но и безголосовой обмен другой информацией (например, метеорологическая) или даже управление бортовым оборудованием.

**Системы предупреждения столкновений (СПС)** подвижных объектов (самолетов, судов) служат дополнением к системам управления движением для повышения надежности процесса управления и безопасности движения последних [1, с. 69]. СПС должна решать задачи:

- обнаружения в зоне движения объекта потенциально опасных (конфликтующих) объектов, с которыми может произойти столкновение;
- определения расстояния наибольшего сближения с конфликтующим объектом, время до возможного столкновения с ним;
- определения и рекомендации маневра по предупреждению столкновения;
- расчет времени начала и окончания маневра.

Для удовлетворительного решения задач СПС погрешности измерения расстояний должны быть достаточно малыми, соизмеримыми с опасными расстояниями сближения. В среднем они могут колебаться от единиц до сотен метров. Как вариант, СПС может строиться на основе СНС, обеспечивающие погрешности определения абсолютных координат с такими же точностями.

#### **1.4 Дифференциальный режим СНС**

Несмотря на достаточно высокую точность навигационно-временного обеспечения, подтвержденную при испытаниях систем «Глонасс» и «Навстар», развернулись работы, направленные на повышение точности и устойчивости функционирования этих систем. Одно из таких направлений связано с реализацией измерений псевдодальности по фазе несущей частоты, а другое – с вводом дифференциального режима (ДР) – режима дифференциальных навигационных определений. Внимание к ДР связано непосредственно со стремлением восстановить точность навигации в нештатных условиях функционирования, вызванных нарушением работы подсистемы КИК, необходимостью обеспечивать решение задач, требующих

точностей выше 10 м, а также стремлением гражданских потребителей повысить точность навигации, предоставляемой им кодом С/А.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования дифференциального метода (ДМ) дали обнадеживающие результаты и выявили его перспективность, в результате чего начались работы по реализации ДР. Для этого необходимо дополнить систему рядом технических средств, совокупность которых можно рассматривать как своеобразную подсистему. Эта дифференциальная подсистема (ДПС) не влияет на функционирование системы в основном, стандартном ее режиме, однако предоставляет потребителю возможность перейти при необходимости на работу в ДР.

В основе ДМ лежит формирование разности отсчетов, поэтому он имеет такое название. ДПС образуют средства наземной контрольно-корректирующей станции (ККС) и дополнительные бортовые устройства потребителя. На ККС размещены: АП система, способная в результате накопления измерений и фильтрации случайных погрешностей обеспечить наиболее точные навигационно-временные параметры; формирователь корректирующей информации (КИ), вычисляющий поправки на сильнокоррелированные погрешности и формирующий кадр КИ; передатчик КИ. На борту потребителя размещаются: аппаратура приема КИ и устройство ввода КИ в стандартную АП. Антенна АП, размещенная на ККС, привязывается на местности с геодезической точностью. На рис. 2 представлена структура дифференциальной подсистемы.



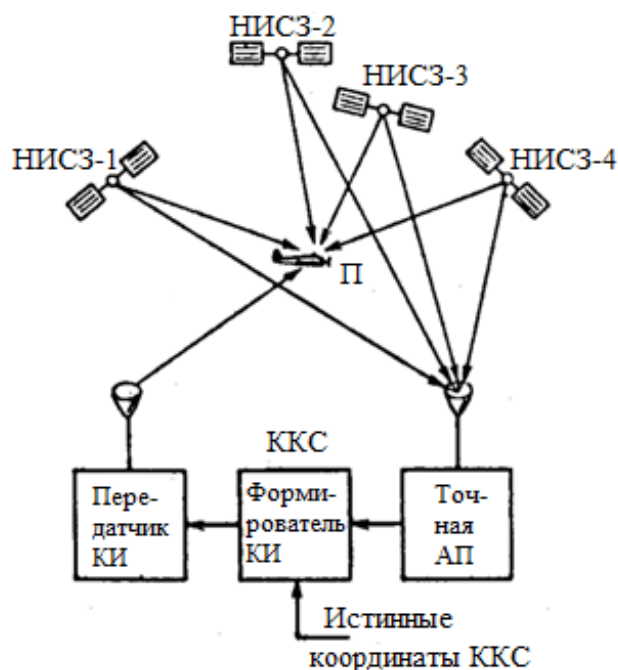


Рисунок 2 – Структура дифференциальной подсистемы

В дифференциальном режиме на борту потребителя результаты определений в стандартном режиме будут автоматически корректироваться с помощью переданных с ККС поправок. Поскольку ККС имеет ограниченную зону действия, на обеспечиваемой территории размещается ряд таких станций, каждой из которых потребитель пользуется в зоне уверенной передачи ею КИ. Должны быть предусмотрены меры для своевременного перехода АП на прием КИ от очередной станции.

При развертывании ДПС естественно стремление к использованию уже имеющихся каналов связи. Поэтому в интересах различных потребителей могут быть задействованы различные средства связи, что придает ДПС многоведомственную специфику.

**Дифференциальными методами НВО** можно назвать методы определения координат, составляющих скорости и времени потребителя по результатам приема и обработки сигналов СНС в двух разнесенных точках ее рабочей зоны. Одна из этих точек – место расположения АП, координаты которой уточняются, вторая – место расположения аппаратуры приема и обработки сигналов, обеспечивающей формирование КИ для уточнения координат потребителя. Вторая точка эталонируется в результате ее привязки

на местности с геодезической точностью и размещения там наиболее точной АП. Совокупность средств, размещенных в эталонируемой точке, образует ККС.

Дифференциальный метод используется для уменьшения погрешности определения координат потребителя по сравнению с погрешностями, имеющими место при стандартном методе НВО, путем исключения сильнокоррелированной их части. Считается, что сильнокоррелированные в двух точках рабочей зоны погрешности обусловлены проявлением эфемеридных погрешностей НИСЗ, уходом его ШВ и влиянием распространения сигналов в ионосфере и тропосфере. Поскольку на эталонированной ККС путем сопоставления ее координат, определенных по сигналам СНС, с априорным их значением можно выявить систематическую погрешность, то такую же систематическую погрешность можно приписать и координатам, определенных потребителем. Если потребителю сообщить с ККС значение соответствующей поправки, он сможет скорректировать результаты своего навигационного определения. Для передачи КИ используется тот или иной канал связи.

### **1.5 Основные задачи при комплексном проектировании СНС**

Для СНС характерны сложная структура, информационные и управляющие связи между элементами разных уровней, пространственная разобщенность подсистем и потребителей.

Совокупность специфических задач, возникающих при проектировании СНС определяется уровнем технических и эксплуатационных требований, предъявляемых к системе.

Кроме того, бортовая аппаратура потребителя должна иметь допустимые габариты, массу и стоимость и отвечать требованиям условий эксплуатации.

## Основные научно-технические задачи проектирования:

- I. Обеспечение синхронизации временных шкал сети НИСЗ с необходимой точностью связано с созданием высокостабильных бортовых и наземных хранителей времени и использованием высокочастотных средств траекторных измерений. Помимо этого требуется исследовать и учитывать множество других факторов, влияющих на уход временных шкал НИСЗ (температура, магнитное поле, радиация, релятивистские эффекты).
- II. Выбор метода радионавигационных измерений определяется требуемой точностью измерения РНП, допустимой продолжительностью интервала измерений, характеристиками достижимой стабильности опорных генераторов частоты на НИСЗ и П, приемлемой сложностью алгоритмов решения навигационной задачи и другими факторами.
- III. При выборе рабочих частот навигационных радиоканалов необходимо прежде всего руководствоваться требованиями регламента радиосвязи, предусматривающего выделение специальных диапазонов радиочастот для навигации. При этом должны учитываться уровень потерь электромагнитной энергии сигнала при распространении радиоволн, в том числе при прохождении границ раздела различных сред, и допустимые рефракционные погрешности. При использовании двухчастотного способа устранения ионосферных погрешностей обе частоты должны находиться в одном диапазоне и обеспечивать требуемый уровень остаточной погрешности. С другой стороны, выбранный диапазон должен обеспечить создание антенно-фидерных устройств на НИСЗ и П с необходимым коэффициентом усиления при приемлемых габаритных характеристиках. Необходимо учитывать также наличие элементной базы для передающих устройств НИСЗ и приемоизмерительных устройств на П.

- IV. Структура и содержание кадра (формата) навигационного сигнала, как наиболее консервативного параметра системы, должен выбираться особенно тщательно. Навигационный сигнал обеспечивает необходимую точность измерения РНП, структурную устойчивость при приеме в условиях естественных и искусственных помех, минимальное время измерения РНП как при приеме сигнала на объекте-потребителе, так и по времени накопления данных (эфемериды, альманах) для решения навигационной задачи. Кадр сигнала должен содержать минимальный объем информации и в то же время иметь необходимый резерв для его совершенствования без доработок действующего парка аппаратуры П. Распределение информации в кадре должно быть удобным для обработки в ЭВМ. Излучаемая мощность навигационного сигнала при выполнении условий нормального приема должна удовлетворять требованию минимального энергопотребления передающих устройств на НИСЗ.
- V. Обеспечение П эфемеридной информацией о координатах и скоростях НИСЗ, прогнозируемых на момент измерений, является одной из специфических задач, решаемых при проектировании СНС. Она распадается на ряд других значительных по сложности и объему задач по созданию командно-измерительных систем необходимой точности, единой (всемирной) системы координат и привязке пунктов КИК к этой системе, разработке схем организации траекторных измерений и способов их обработки. Для высокочастотного долгосрочного прогнозирования координат НИСЗ важно знать геопотенциал и другие факторы, влияющие на движение НИСЗ. Время устаревания эфемеридной информации до предельно допустимых значений определяет длительность автономной работы НИСЗ без обновления начальных условий, а следовательно, загрузку наземных средств КИК сеансами связи с НИСЗ. Вид представления эфемеридной информации в кадре сигнала определяет объем

запоминающих устройств НИСЗ и, с другой стороны, объем вычислительных процедур на П.

- VI. Выбор и обоснование структуры сети НИСЗ производится исходя из заданной пространственной зоны обслуживания, мерности вектора состояния и обеспечения непрерывности навигационных определений при минимальном числе НИСЗ в системе. Высоту орбит НИСЗ выбирают такой, чтобы можно было измерять РНП с требуемой точностью и оперативностью. С другой стороны, высота орбиты должна быть минимальной для уменьшения энергетических затрат на выведение НИСЗ и потерь энергии радиоволн при распространении. Сеть НИСЗ должна обладать необходимой структурной устойчивостью, чтобы на весь период существования системы сохранялись территориально-временные характеристики обслуживания. При этом не исключается активная коррекция положения НИСЗ на орбите. Структура сети должна также обеспечивать управление НИСЗ и траекторные измерения с участков территории земного шара, где расположены пункты командно-измерительного комплекса (КИК). Помимо указанных требований имеется еще ряд условий, связанных с использованием существующих носителей, космодромов.
- VII. Помехозащищенность обеспечивается выбором структуры навигационного сигнала, необходимым энергетическим потенциалом в месте приема, пространственной селекцией сигналов, сведением к минимуму внутрисистемных помех (разделение излучений НИСЗ), использованием нелинейных подавителей помех в приемном тракте аппаратуры П.
- VIII. Геодезическое обеспечение призвано способствовать точному долгосрочному прогнозированию движения НИСЗ. Кроме того, необходимо обеспечить пересчет координат из геоцентрической системы в любую другую (геодезическую, географическую,

ортодромическую) и обратно без существенных потерь точности. Для решения задачи геодезического обеспечения СНС могут разрабатываться программы исследований с использованием космических комплексов и гравиметрических средств.

Помимо перечисленных основных задач при проектировании СНС решается ряд крупных инженерно-технических задач по разработке, испытанию и изготовлению технических подсистем и комплексов. Прежде всего это создание НИСЗ как главного элемента СНС, КИК, ЦУ, системы быстродействующих наземных линий связи и т.д.

Все основные задачи требуют нахождения комплекса из компромиссных решений, и вся разработка системы требует очень объемной и тщательной работы с привлечением большого количества человеческих, интеллектуальных, материальных и временных ресурсов. До недавнего времени это было доступно только лишь крупным и развитым государствам – огромным политическим организациям с соответствующими материальными и управленческими возможностями. Тем более удивительно осознавать, что в настоящее время уже и коммерческие компании с частным капиталом могут позволить себе разрабатывать подобные спутниковые системы (Starlink компании SpaceX Илона Маска), а также самостоятельно развертывать и воплощать их в действительность.

### **1.6 Расчет релятивистских эффектов в СНС**

Для расчетов возьмем Систему Глобального Позиционирования GPS. Текущая конфигурация состоит из 32 спутников, которые вращаются вокруг Земли на орбитах высотой около 20180 км со скоростью около 14000 км/ч. Каждый спутник несет на своем борту атомные часы, точность которых составляет 1 наносекунду. GPS-приемник потребителя определяет свое текущее положение путем сравнения сигналов времени, получаемых с разных GPS-спутников и трилатерации по текущему положению каждого из них.

Если мы хотим получать точность в 5-10 метров при определении местоположения, нам понадобится погрешность определения времени в 20-30 наносекунд. Посмотрим, насколько сильные релятивистские эффекты возникают при движении спутников, и стоит ли обязательно их учитывать.

Спутники движутся с большой скоростью, и специальная теория относительности (СТО) [6] утверждает, что для наблюдателя на Земле их часы отсчитывают время медленнее. В соответствии с СТО бортовые атомные часы на спутниках запаздывают по сравнению с земными примерно на 7 микросекунд в день из-за релятивистского замедления времени (по формуле преобразования Лоренца):

$$\Delta t = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - t = \frac{24 * 60 * 60}{\sqrt{1 - \left(\frac{14000}{3.6}\right)^2}} - 24 * 60 * 60 \approx 7 * 10^{-6}.$$

Кроме того, спутники находятся на орбитах на большом расстоянии от Земли, где кривизна пространства-времени из-за массы Земли меньше, чем на земной поверхности. По общей теории относительности (ОТО) ход часов, расположенных ближе к массивному объекту, будет казаться медленнее, чем тех, кто находится дальше от него. Так, для нас часы на спутниках кажутся более быстрыми, чем аналогичные часы на земле. Расчеты, опирающиеся на ОТО, показывают, что часы на каждом спутнике GPS спешат относительно земных на 46 микросекунд в день (по формуле выводов Минковского):

$$\begin{aligned} \Delta t = \Delta n * t &= \left( \sqrt{1 - \frac{2 * G * M * h_2}{c^2}} - \sqrt{1 - \frac{2 * G * M * h_1}{c^2}} \right) * t = \\ &= \left( \sqrt{1 - \frac{2 * 6,67 * 10^{-11} * 5,97 * 10^{24} * (6371 + 20180) * 1000}{(3 * 10^8)^2}} \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{1 - \frac{2 * 6,67 * 10^{-11} * 5,97 * 10^{24} * 6371 * 1000}{(3 * 10^8)^2}} \right) * 24 * 3600 \\ &\approx 46 * 10^{-6}. \end{aligned}$$

Комбинация этих двух эффектов означает, что часы на борту каждого спутника должны идти быстрее, чем аналогичные часы на земле примерно на 39 ( $46 - 7 = 39$ ) микросекунд в день, то есть 39 тысяч наносекунд, что в тысячу раз больше требуемой погрешности. Если бы эти эффекты не были учтены, то координаты, вычисленные на основе облака GPS-спутников, были бы неверными уже через две минуты, а ошибки в глобальных местоположениях продолжали бы накапливаться со скоростью примерно 12 километров в день.

Инженеры, проектировавшие GPS, включили эти релятивистские эффекты в свои расчеты во время проектирования и развертывания системы. К примеру, они замедлили ход атомных часов перед их запуском, так что будучи на своих орбитах, они шли бы с той же скоростью, что и эталонные атомные часы на наземных станциях GPS. Кроме того, в каждый GPS-приемник встроен микрокомпьютер, который (помимо прочего) выполняет необходимые релятивистские вычисления в момент определения местоположения пользователя.



## 2 Моделирование СНС

### 2.1 Постановка цели и задач для исследования

В практической части работы цель моего исследования: изучить различные конфигурации СНС, провести сравнительный анализ их эффективности. Для достижения этой цели необходимо решить такие задачи:

- 1) разработать программу-симулятор СНС с гибко настраиваемыми параметрами;
- 2) смоделировать существующие СНС разных стран;
- 3) определить зону радиопокрытия и эффективность спутниковой группировки;
- 4) исследовать другие возможные конфигурации спутников;
- 5) подтвердить эффективность существующих СНС или предложить новую.

СНС устанавливает местоположение объекта путем определения его удаленности от спутников. Для оперативной СНС нам необходимо видеть минимум 4 спутника в каждый момент времени (рис. 3).

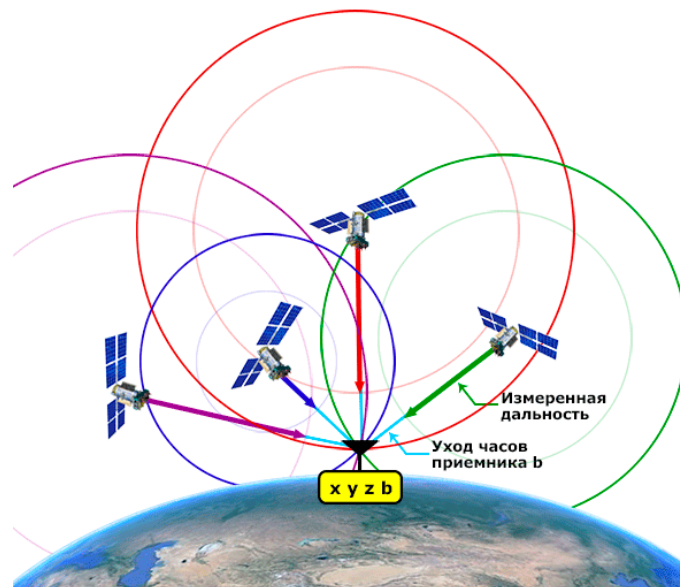


Рисунок 3 – Определение местоположения в спутниковой навигации

В процессе передачи сигнала возникают различные ошибки, указанные на рисунке 4.

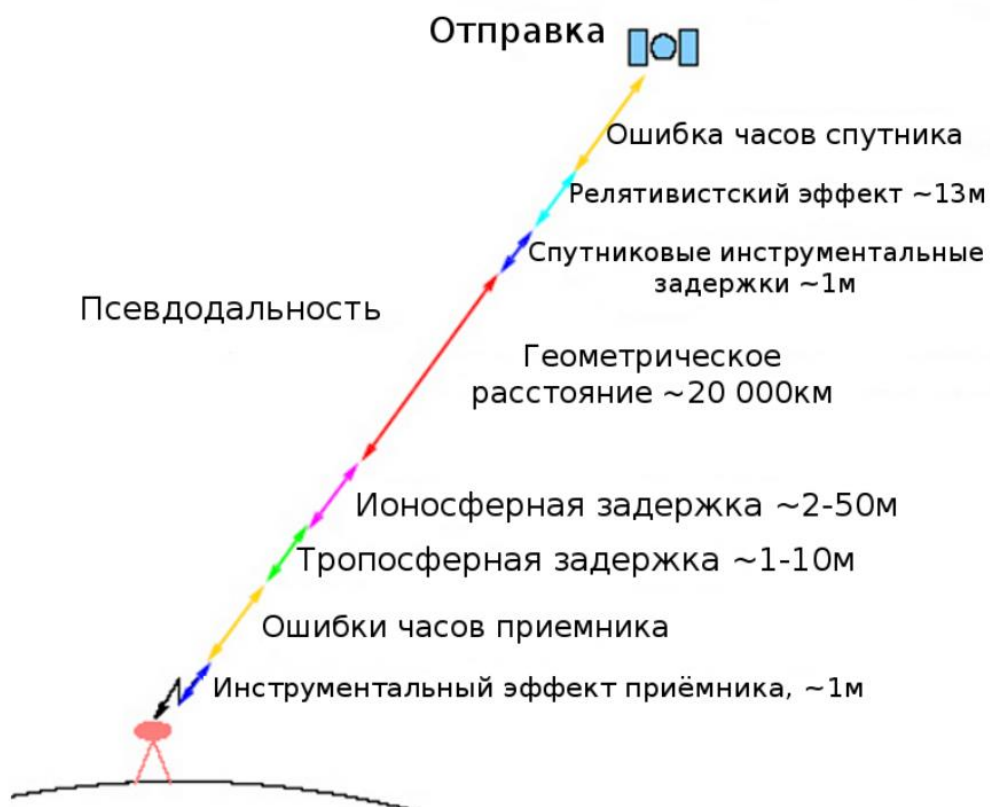


Рисунок 4 – Различные ошибки при передаче сигнала

Поэтому найденное с определенной точностью местоположение объекта представляет собой область некоторого размера (рис. 5).

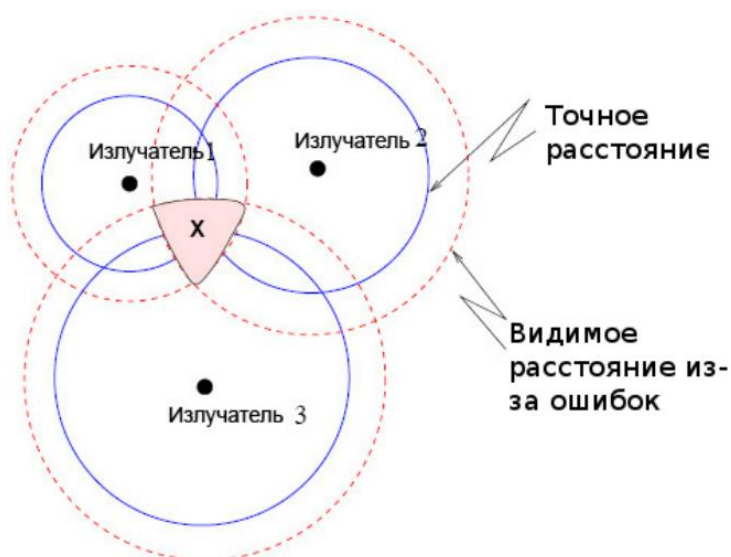


Рисунок 5 – Область возможного расположения объекта

У различных СНС: российской ГЛОНАСС, американской GPS, европейской Galileo, китайской Beidou – имеются различные количество орбит, их наклонение, высота и количество спутников (табл. 1) [2]. Возникает

вопрос, какая конфигурация спутников является наилучшей с точки зрения минимальных затрат при максимальной радиовидимости.

Таблица 1 – Параметры спутниковых конфигураций различных СНС

Название СНС	Кол-во орбит	Кол-во спутников	Высота	Наклонение
ГЛОНАСС	3	24	19 100 км	64,8°
GPS	6	32	20 200 км	55°
Galileo	3	30	23 222 км	56°
Beidou	7	35	21 528 км 35 786 км	0° 55°

## 2.2 Создание программы

Такую задачу решить только математическими методами будет крайне сложно, ввиду этого было принято решение использовать интерактивную 3D-модель. Существуют игровые движки, которые можно использовать для создания модели со всеми задуманными условиями, тонкостями и расчетами в режиме реального времени. Игровой движок – комплекс программ, обеспечивающих графическую визуализацию, звуковое сопровождение, перемещение внутриигровых объектов, их действия в соответствии со скриптами, соблюдение физических эффектов и законов. Самые популярные на сегодняшний день движки: Unity на языке C#; Unreal Engine на языке C++. Для создания модели можно использовать любой из них, был выбран Unity.

## 2.3 Среда разработки

При работе был использован язык C# (произносится си шарп) – объектно-ориентированный язык программирования. Разработан в 1998-2001 годах группой инженеров компании Microsoft как язык разработки приложений для платформы Microsoft .NET Framework и .NET Core. Впоследствии был стандартизирован как ECMA-334 и ISO/IEC 23270.

C# относится к семье языков с C-подобным синтаксисом, из них его синтаксис наиболее близок к C++ и Java. Язык имеет статическую типизацию,

поддерживает полиморфизм, перегрузку операторов (в том числе операторов явного и неявного приведения типа), делегаты, атрибуты, события, переменные, свойства, обобщенные типы и методы, итераторы, анонимные функции с поддержкой замыканий, LINQ, исключения, комментарии в формате XML.

Переняв многое от своих предшественников – языков C++, Delphi, Модула, Smalltalk и, в особенности, Java – C#, опираясь на практику их использования, исключает некоторые модели, зарекомендовавшие себя как проблематичные при разработке программных систем, например, C# в отличие от C++ не поддерживает множественное наследование классов (между тем допускается множественная реализация интерфейсов).

Проект был построен в среде Unity (в переводе с англ. – «единство») – межплатформенной среде разработки компьютерных игр, разработанной американской компанией Unity Technologies. Unity позволяет создавать приложения, работающие на более чем 25 различных платформах, включающих персональные компьютеры, игровые консоли, мобильные устройства, интернет-приложения и другие. Выпуск Unity состоялся в 2005 году и с того времени идет постоянное развитие.

Основными преимуществами Unity являются наличие визуальной среды разработки, межплатформенной поддержки и модульной системы компонентов. К недостаткам относят появление сложностей при работе с многокомпонентными схемами и затруднения при подключении внешних библиотек.

На Unity написаны тысячи игр, приложений, визуализации математических моделей, которые охватывают множество платформ и жанров. При этом Unity используется как крупными разработчиками, так и независимыми студиями.

Проект в Unity делится на сцены – отдельные файлы, содержащие свои игровые миры со своим набором объектов, сценариев, и настроек. Например, сцена с конфигурацией ГЛОНАСС, GPS, Galileo. Сцены могут содержать в

себе как объекты с моделью (Земля, НКА, конус радиосигнала на рисунке 6), так и пустые игровые объекты, не имеющих модели (детектор, индикатор) [4].

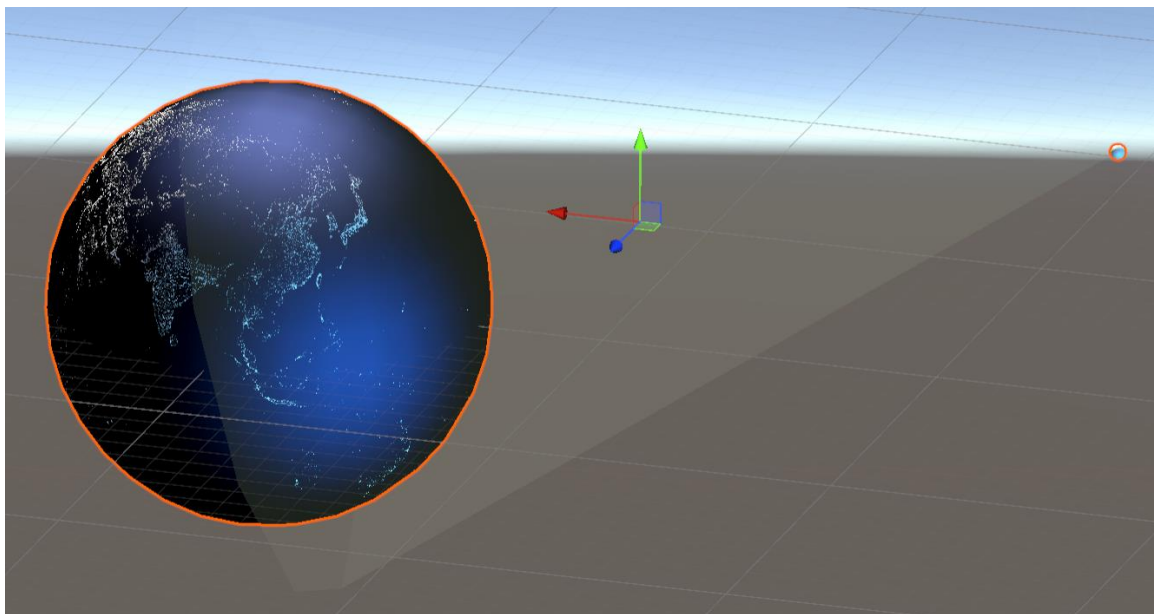


Рисунок 6 – Изображение Земли, спутника и конуса радиосигнала

Объекты, в свою очередь содержат наборы компонентов (рис. 7), с которыми и взаимодействуют скрипты. Также у объектов есть название, может быть тег (метка) и слой, на котором он должен отображаться. У всех объектов на сцене обязательно присутствует компонент Transform (также присутствует на рис. 7) – он хранит в себе координаты местоположения, поворота и размеров объекта по всем трем осям. У объектов с видимой геометрией также присутствует компонент Mesh Renderer (рис. 7), делающий модель объекта видимой.

К объектам можно применять коллизии (в Unity т. н. коллайдеры – collider), которых существует несколько типов.

Также Unity поддерживает физику твердых тел и ткани, а также физику типа Ragdoll (тряпичная кукла). В редакторе имеется система наследования объектов; дочерние объекты будут повторять все изменения позиции, поворота и масштаба родительского объекта. Скрипты в редакторе прикрепляются к объектам в виде отдельных компонентов.



Рисунок 7 – Набор компонентов у объекта-Земли

Для создания симулятора мною было разработано 5 скриптов:

1. «Attractor» (45 строк) моделирует гравитационное притяжение между Землей и спутниками; моделирует вращение Земли.
2. «Cone» (75 строк) создает и рисует коническое тело с заданной шириной диаграммы направленности.
3. «Detecting» (30 строк) имитирует получение спутникового сигнала путем проверки: пересекаются ли детектор и конус радиосигнала.
4. «Indicator» (100 строк) собирает данные со всех детекторов и выводит на экран список с количеством видимых спутников для каждого детектора. Рассчитывает показатель эффективности. Равномерно размещает датчики на поверхности Земли.
5. «Orbit» (65 строк) рассчитывает множество точек, лежащих на орбите с заданными параметрами, равномерно располагает на ней спутники и

задает им такую начальную скорость, рассчитанную по формуле первой космической скорости, чтобы они двигались по заданной орбите.

Для наглядности моделирования визуальные размеры навигационных спутников были представлены в виде сфер и увеличены в 40000 раз: с 10 м до 400 км в диаметре. Для этой же цели скорость моделирования была увеличена в 1200 раз: за 1 секунду, которую мы наблюдаем в программе, проходит 20 минут реального времени.

Также ко всем игровым объектам-спутникам был добавлен компонент Unity Trail Renderer, который выполняет отрисовку траектории, пройденной данным объектом.

## 2.4 Модель гравитации

Каждый спутник и Земля имеет массу, и в каждый момент времени на них действует гравитационная сила притяжения (рис. 8) – т.е. выполняется скрипт, который прибавляет к текущему вектору скорости тела (каждого объекта с тегом «Celestial») новый вычисленный вектор (рис. 9). Листинг программы представлен в Приложении А.

Масса Земли принята за  $5,97 \cdot 10^{24}$  кг, масса спутника – за 1000 кг.

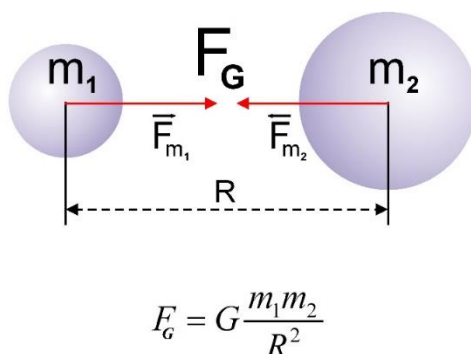


Рисунок 8 – Гравитационная сила притяжения двух тел

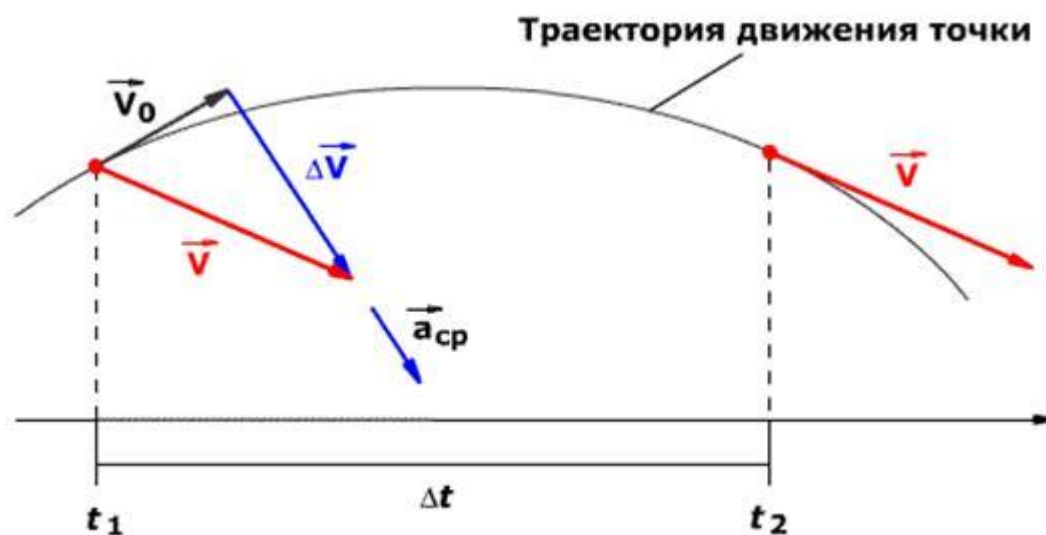


Рисунок 9 – Изменение вектора скорости под действием силы притяжения

Помимо притяжения, данный скрипт выполняет вращение объекта-Земли вокруг своей оси. Это происходит ускоренно с угловой скоростью:

$$\frac{360^\circ}{23 \text{ ч } 56 \text{ мин } 4 \text{ с}} * 1200 = 5,0137^\circ \text{ с}^{-1}.$$

## 2.5 Модель радиоконуса

Для создания объекта-конуса радиосигнала нужно использовать модель конуса. Если для сферы или куба в Unity предусмотрены готовые шаблоны, то для конического тела они отсутствуют, и нам нужно самим дополнительно написать алгоритм для его создания. Обозначим некоторые параметры нашего тела (рис. 10):

$h$  – расстояние от спутника (вершины) до центра Земли;

$\alpha$  – ширина диаграммы направленности (угол конуса);

$R$  – радиус основания,

$$R = tg(\alpha) * h.$$



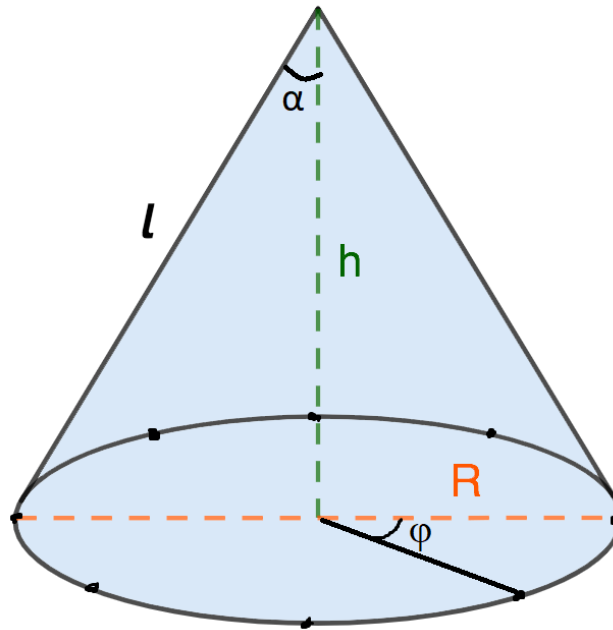


Рисунок 10 – Геометрическое тело конус

Так как в графике используются полигональные объекты (полностью замкнутые области, ограниченные прямолинейными сегментами, проходящими через вершины), то аппроксимируем конус многогранной пирамидой (рис. 11):

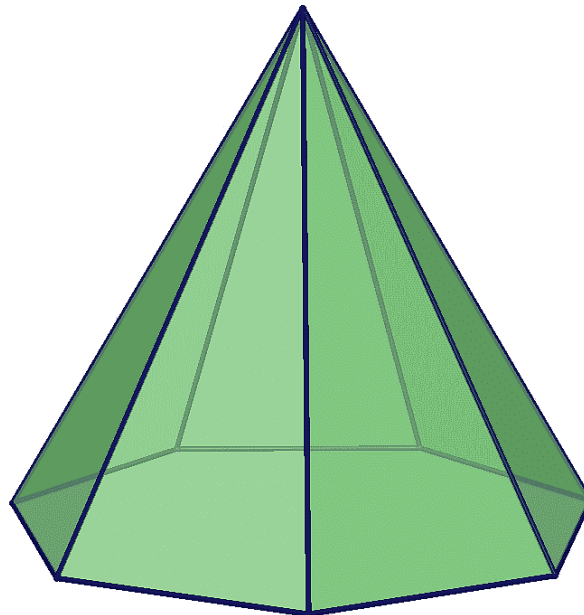


Рисунок 11 – Аппроксимация конуса пирамидой

Такая пирамида представляет собой набор треугольников. Значит, нам нужно создать необходимое количество треугольников по вычисленным

координатам  $x, y, z$ . Для этого выполним следующий алгоритм при  $i$  от 0 до  $n$  (рис. 12):

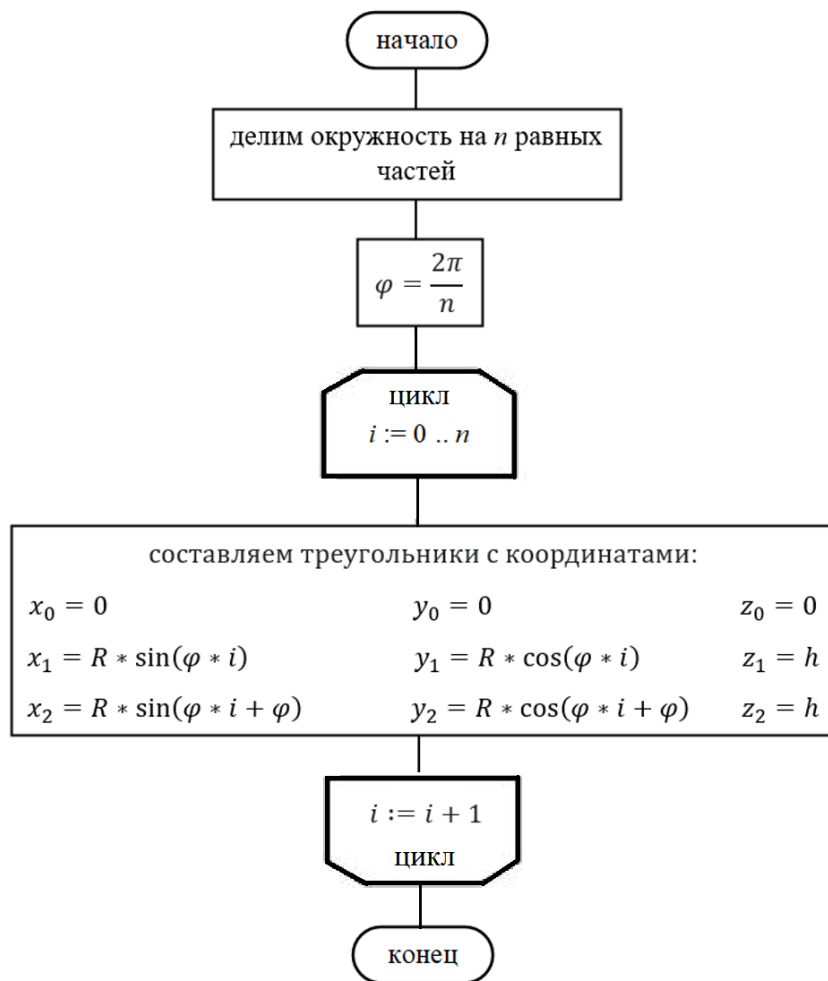


Рисунок 12 – Алгоритм по нахождению координат для вершин треугольников

Угол  $\varphi$  также изображен выше на рис. 10.

Кроме того, после создания конуса в сцене происходит его непрерывное вращение (поворот на определенный градус каждый момент времени) таким образом, чтобы его плоскость основания всегда проходила через центр Земли, т.е. чтобы конус всегда был направлен в сторону Земли. Вершина конуса же всегда будет находиться в центре спутника, потому что объект-конус является дочерним объектом у спутника, а наследник повторяет все пространственные изменения родителя и движется вместе с ним.

Таким способом создается конус радиосигнала. На практике оказалось, что 10 граней пирамиды уже достаточно, чтобы мы могли наблюдать коническое тело. Листинг программы представлен в Приложении Б.

## 2.6 Модель детектора сигналов

На поверхности Земли располагаются «датчики» улавливания радиосигнала от спутников (рис. 13). Они выполнены в виде дочерних к Земле объектов, чтобы вращаться вместе с планетой. Для контраста окрашены в сиреневый цвет, имеют форму сферы. С помощью них мы будем определять, сколько спутников видно из каждой конкретной точки Земли.

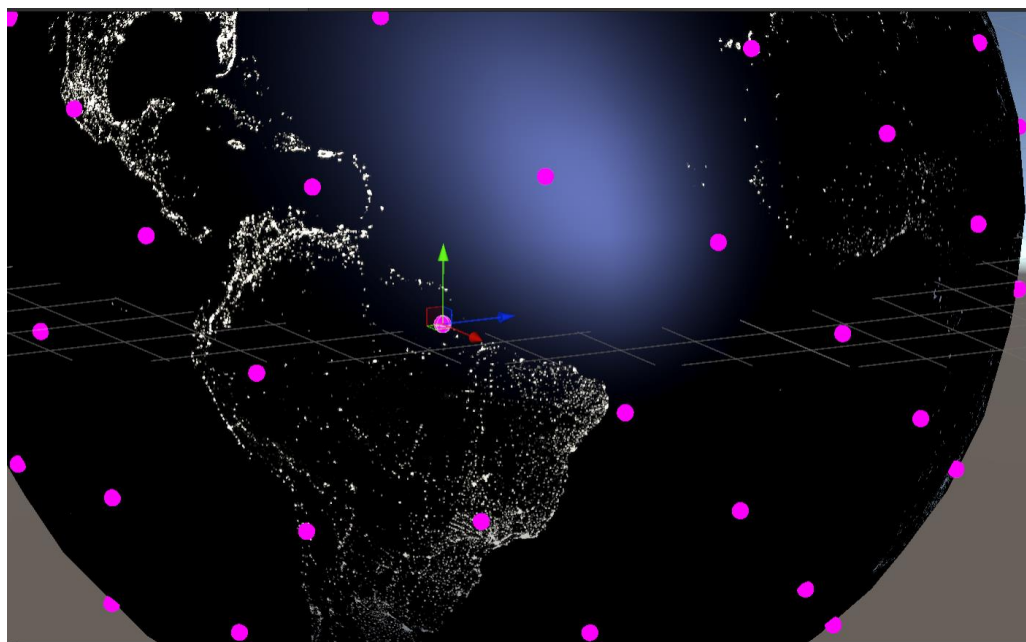


Рисунок 13 – Расположение датчиков на поверхности Земли

Улавливание радиосигнала выполнено в виде следующей идеи: если объект-детектор пересекается с объектом-конусом, то спутник находится в зоне нашей радиовидимости, сигнал принимается.

Для обнаружения столкновений в Unity предусмотрены компоненты, называемые коллайдеры. Данные о столкновении обрабатываются коллайдером и предоставляются нам с помощью нескольких функций, что позволяет нам задавать более конкретное поведение, когда объекты входят, занимают и покидают ограничивающую рамку, если это необходимо.

Были использованы встроенные функции `OnTriggerEnter` и `OnTriggerExit` для подсчета количества появившихся и исчезнувших столкновений. Таким образом мы получаем общее число столкновений в текущий момент времени для конкретного детектора. Другими словами, узнаем, сколько спутников сейчас видно из заданной точки на Земле.

Переменную, в которой хранится значение этого числа видимых спутников, мы делаем публичной для последующей передачи в нижеприведенный скрипт. Листинг программы представлен в Приложении В.

## 2.7 Сбор данных и расположение детекторов

В этом алгоритме решается задача сбора и обработки информации со всех детекторов, которых может быть десятки и сотни штук. Для этого мы для каждого объекта с тегом «Detectors» считываем его публичное поле со значением видимых спутников (обозначим как  $x_i$ ) и добавляем в список. После чего выводим этот список в консоль (рис. 14). Эта операция повторяется каждый момент времени. Листинг программы представлен в Приложении Г.

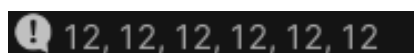


Рисунок 14 – Список количества видимых спутников от каждого детектора

Этот список может содержать большое количество значений, поэтому для анализа гораздо удобнее взять среднее арифметическое количество видимых спутников среди всех детекторов  $N_d$  в данный момент времени. Обозначим эту величину как:

$$X_{\text{ср}} = \frac{\sum_i x_i}{N_d}.$$

Результат будет более наглядным, но из-за постоянного перемещения спутников в пространстве это число будет все время колебаться. Поэтому будет еще более удобно рассчитать среднее арифметическое количество видимых спутников среди всех детекторов за все время (за  $N_k$  кадров). Запись ( $N_k$ ) означает зависимость от  $N_k$ :

$$\overline{X_{\text{ср}}} = \frac{\sum_{N_k} X_{\text{ср}}(N_k)}{N_k}.$$

Поначалу эта величина тоже будет колебаться, но со временем приблизится к определенному уровню.

Далее введем специальный коэффициент для оценки эффективности спутниковой конфигурации. Мы хотим увидеть наибольшее количество

спутников, видимых в среднем, при наименьших затратах, т.е. наименьшем общем количестве запускаемых спутников  $N_c$ . Этому требованию будет соответствовать коэффициент:

$$E = \frac{\overline{X_{cp}}}{N_c}$$

с тем ограничением, что  $x_i$  не должно быть меньше 4, иначе СНС перестанет отвечать требованиям оперативности, не будет доступен к использованию в любой момент времени, или требованиям глобальности, будет доступен не в каждой точке земного шара.

Коэффициент  $E$  показывает нам, какую часть от всех спутников видно в каждый момент времени с любой точки Земли. Чем он будет больше, тем эффективнее будет считаться система. Предлагается умножить это число на 100%, чтобы работать с более удобными процентами вместо дробей. В итоге, основная формула для последующих исследований будет:

$$E = \frac{\overline{X_{cp}}}{N_c} * 100\%. \quad (1)$$

Так, при каждом моделировании какой-либо конфигурации, мы будем получать следующие данные в консоль (рис. 15):

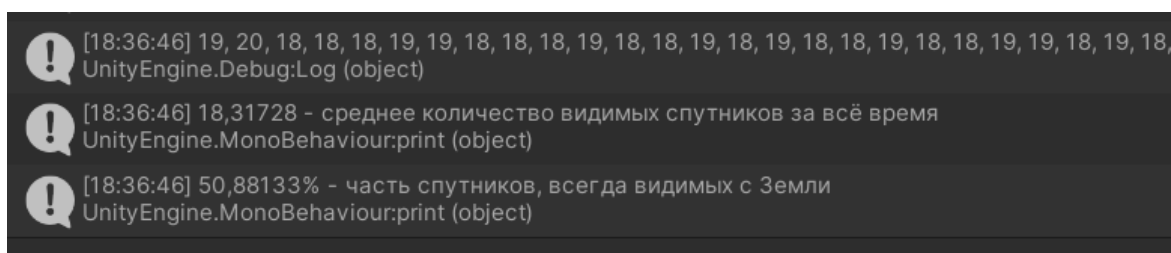


Рисунок 15 – Выводимые в консоль данные

Еще одна функция этого скрипта – равномерное распределение детекторов на сфере Земли. Для этого используется наложение решетки Фибоначчи (золотая спираль или сетка Фибоначчи) на поверхность сферы. Обозначим коэффициент золотого сечения как:

$$\Phi = \frac{\sqrt{5} + 1}{2}.$$

Алгоритм нахождения координат  $n$  точек на сфере (рис. 16) при  $i$  от 0 до  $n$ :

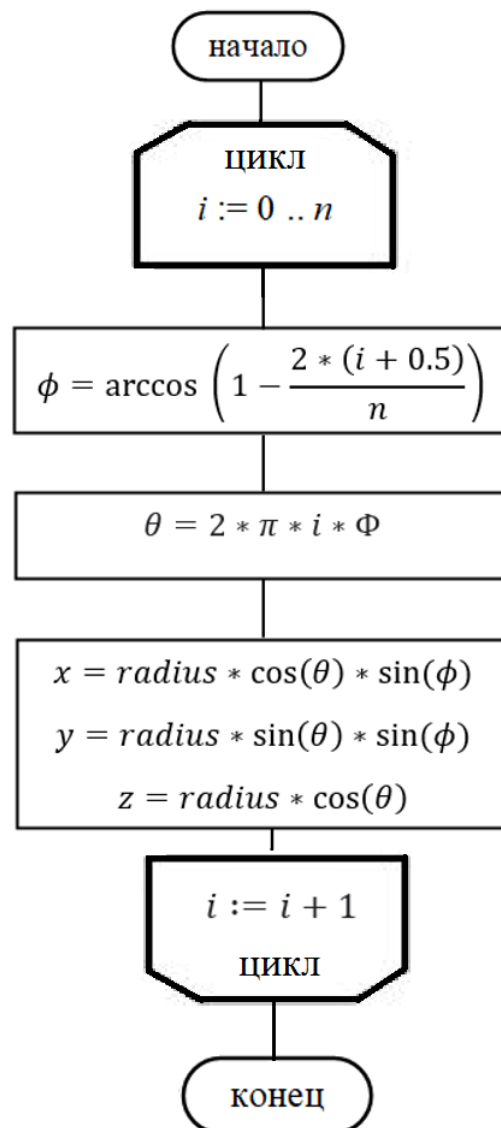


Рисунок 16 – Алгоритм нахождения координат по методу решетки Фибоначчи

## 2.8 Моделирование орбит и расположение спутников

В этом алгоритме реализовано размещение спутников на орбите с определенными заданными параметрами: радиус, наклонение к каждой оси, количество спутников на орбите. Листинг программы представлен в Приложении Д.

Орбита изображается в виде окружности, а окружность в пространстве можно математически представить как пересечение плоскости и сферы (рис. 17):

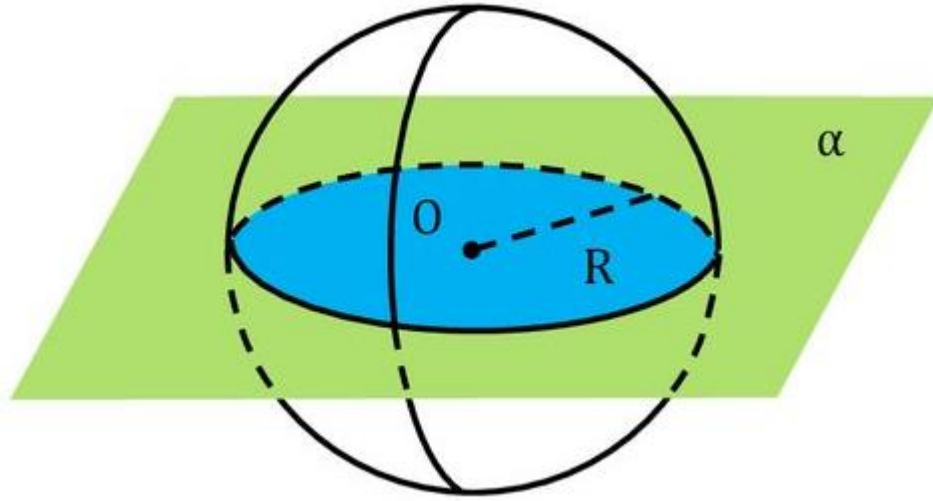


Рисунок 17 – Изображение окружности как пересечение плоскости и сферы

Множество точек, расположенных на заданной орбите, удовлетворяет решению системы уравнений плоскости и сферы:

$$\begin{cases} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2, \\ a \cdot (x - x_0) + b \cdot (y - y_0) + c \cdot (z - z_0) = 0. \end{cases}$$

Координаты точек, лежащих на окружности, при решении системы уравнений выражаются через параметр  $t$  как:

$$\begin{cases} x = x_0 + \frac{R}{\sqrt{a^2 + c^2}} \cdot \left( c \cdot \cos t - \frac{a \cdot b \cdot \sin t}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right), \\ y = y_0 + \frac{R \cdot \sqrt{a^2 + c^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \cdot \sin t, \\ z = z_0 - \frac{R}{\sqrt{a^2 + c^2}} \cdot \left( a \cdot \cos t + \frac{b \cdot c \cdot \sin t}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right), \end{cases} \quad t \in [0; 2\pi).$$

С помощью параметра  $t$  мы определяем, в какой части окружности будет располагаться точка. Параметры  $a$ ,  $b$ ,  $c$  являются координатами вектора-нормали к плоскости окружности (рис. 18):

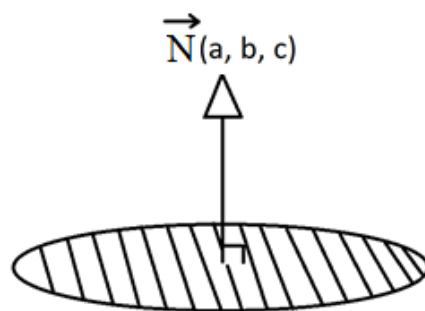


Рисунок 18 – Вектор-нормаль к плоскости окружности

В момент старта симуляции спутникам задается начальная скорость  $v$  такая, чтобы они вращались вокруг Земли по своей орбите, не падая и не разлетаясь. Вычисляется по формуле первой космической скорости:

$$v = \sqrt{G \frac{M}{R}}.$$

Вектор скорости задается перпендикулярно радиусу орбиты, то есть по касательной к окружности.

## 2.9 Моделирование существующих СНС

Зададим необходимые параметры объекту-орбите, чтобы создать и смоделировать реально существующие СНС.

Наклонение орбиты искусственного спутника Земли – это угол между плоскостью его орбиты и плоскостью экватора Земли (рис. 19).



Рисунок 19 – Схема с характеристиками плоскости орбиты



Тангенс такого угла  $i$ , прибавленного к  $90^\circ$ , даст нам соотношение двух координат вектора-нормали к плоскости орбиты. Так, чтобы наклонить плоскость орбиты под углом  $i$  к оси  $x$ , нам понадобится задать вектор-нормаль с соотношением координат  $(0; 1; tg(i + 90^\circ))$ .

Радиус орбиты  $R$  (Radius) складывается из радиуса Земли и высоты над поверхностью планеты. Количество спутников на орбите обозначим  $N$  (SatNumber). Проведем расчеты для ГЛОНАСС:

$$tg(64,8^\circ) \approx 2,125;$$

$$R = 6371 + 19100 = 25471;$$

$$N = 8.$$

Получаем следующие параметры (рис. 20) для трех орбит ГЛОНАСС (рис. 21):

Orbit (Script)	Orbit (Script)	Orbit (Script)
Script	Script	Script
Point Prefab	Point Prefab	Point Prefab
Radius	Radius	Radius
Sat Number	Sat Number	Sat Number
A	A	A
B	B	B
C	C	C

Орбита 1

Script	Orbit
Point Prefab	Sattelite (Transfo)
Radius	25471
Sat Number	8
A	0
B	1000
C	2125

Орбита 2

Script	Orbit
Point Prefab	Sattelite (Transfo)
Radius	25471
Sat Number	8
A	0
B	1000
C	-2125

Орбита 3

Script	Orbit
Point Prefab	Sattelite (Transfo)
Radius	25471
Sat Number	8
A	2125
B	1000
C	0

Рисунок 20 – Параметры у орбит ГЛОНАСС

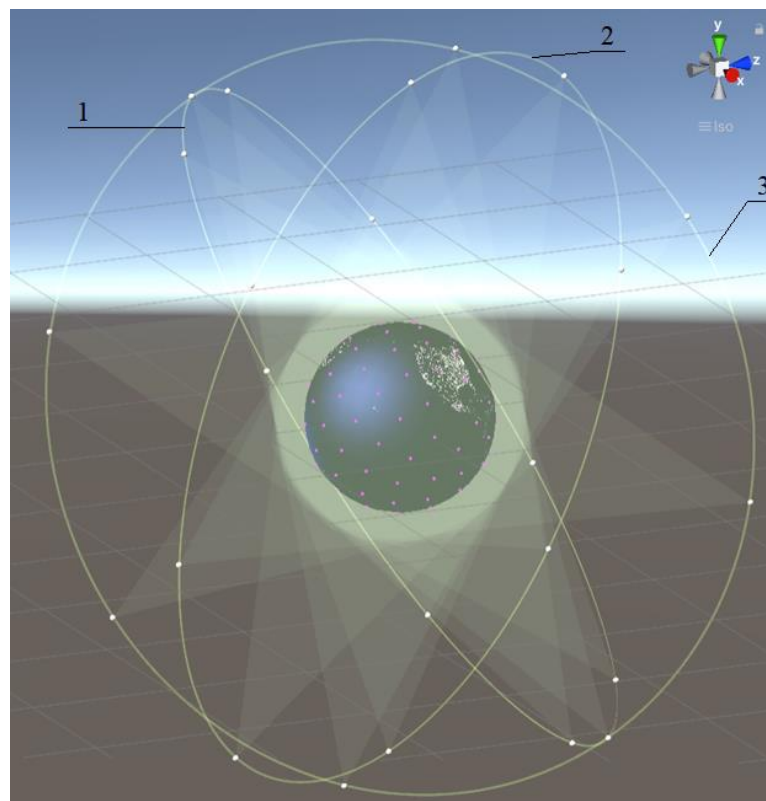


Рисунок 21 – Спутниковая группировка ГЛОНАСС

Проведем расчеты для СНС Galileo:

$$tg(56^\circ) \approx 1,483;$$

$$R = 6371 + 23222 = 29593;$$

$$N = 10.$$

Получаем следующие параметры (рис. 22) для трех орбит СНС Galileo (рис. 23):

Орбита 1		Орбита 2		Орбита 3	
Script	Orbit	Script	Orbit	Script	Orbit
Point Prefab	Sattelite (Transfo)	Point Prefab	Sattelite (Transfo)	Point Prefab	Sattelite (Transfo)
Radius	29593	Radius	29593	Radius	29593
Sat Number	10	Sat Number	10	Sat Number	10
A	0	A	0	A	1483
B	1000	B	1000	B	1000
C	1483	C	-1483	C	0

Рисунок 22 – Параметры у орбит Galileo

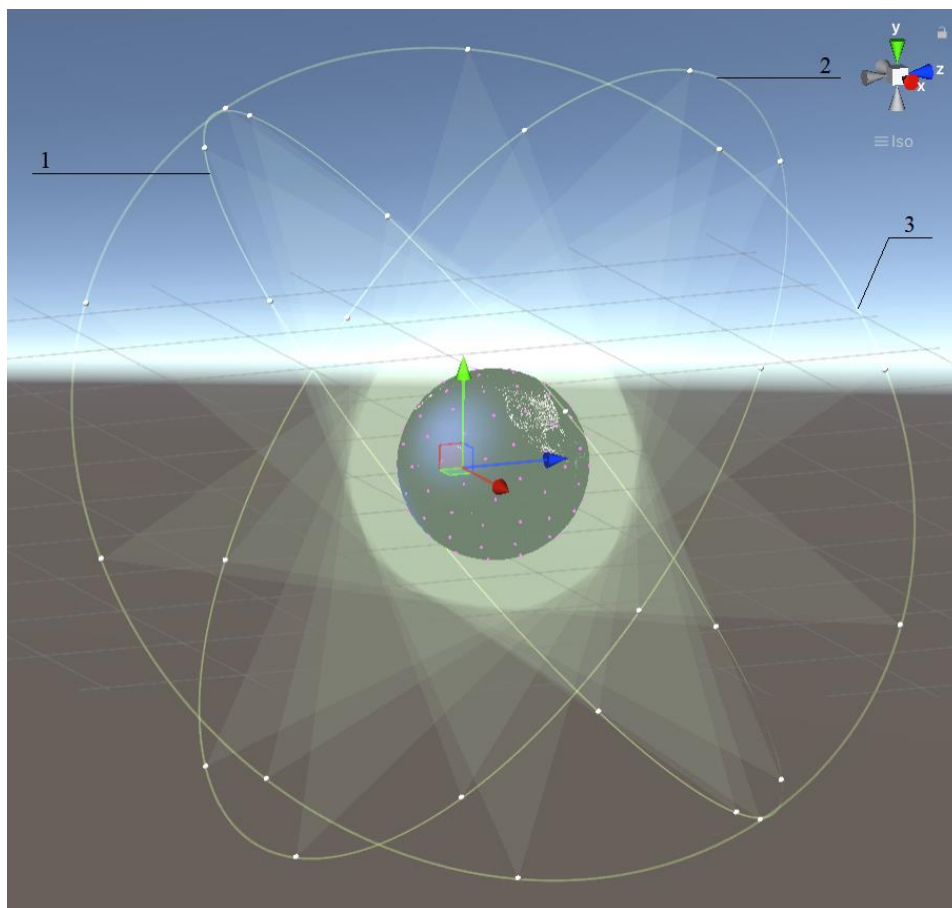


Рисунок 23 – Спутниковая группировка Galileo

В GPS орбиты по долготе восходящего узла расположены равномерно с углом:

$$\frac{360^\circ}{6} = 60^\circ.$$

50

Проведем расчеты для GPS:

$$\operatorname{tg}(55^{\circ}) \approx 1,428;$$

$$\operatorname{tg}(60^{\circ}) \approx 1,732;$$

$$1,428 * 1,732 \approx 2,473;$$

$$R = 6371 + 20200 = 26571;$$

$$N = 6.$$

Получаем следующие параметры (рис. 24) для шести орбит GPS (рис. 25):

<div>Orbit (Script)</div> <div>Script: Orbit</div> <div>Point Prefab: Sattelite (Transfo)</div> <div>Radius: 26571</div> <div>Sat Number: 6</div> <div>A: 0</div> <div>B: 1000</div> <div>C: 1428</div>	<div>Orbit (Script)</div> <div>Script: Orbit</div> <div>Point Prefab: Sattelite (Transfo)</div> <div>Radius: 26571</div> <div>Sat Number: 6</div> <div>A: 2473</div> <div>B: 1732</div> <div>C: 1428</div>	<div>Orbit (Script)</div> <div>Script: Orbit</div> <div>Point Prefab: Sattelite (Transfo)</div> <div>Radius: 26571</div> <div>Sat Number: 6</div> <div>A: 2473</div> <div>B: 1732</div> <div>C: -1428</div>
Орбита 1	Орбита 2	Орбита 3
<div>Orbit (Script)</div> <div>Script: Orbit</div> <div>Point Prefab: Sattelite (Transfo)</div> <div>Radius: 26571</div> <div>Sat Number: 6</div> <div>A: 0</div> <div>B: -1000</div> <div>C: 1428</div>	<div>Orbit (Script)</div> <div>Script: Orbit</div> <div>Point Prefab: Sattelite (Transfo)</div> <div>Radius: 26571</div> <div>Sat Number: 6</div> <div>A: 2473</div> <div>B: -1732</div> <div>C: 1428</div>	<div>Orbit (Script)</div> <div>Script: Orbit</div> <div>Point Prefab: Sattelite (Transfo)</div> <div>Radius: 26571</div> <div>Sat Number: 6</div> <div>A: 2473</div> <div>B: -1732</div> <div>C: -1428</div>
Орбита 4	Орбита 5	Орбита 6

Рисунок 24 – Параметры у орбит GPS

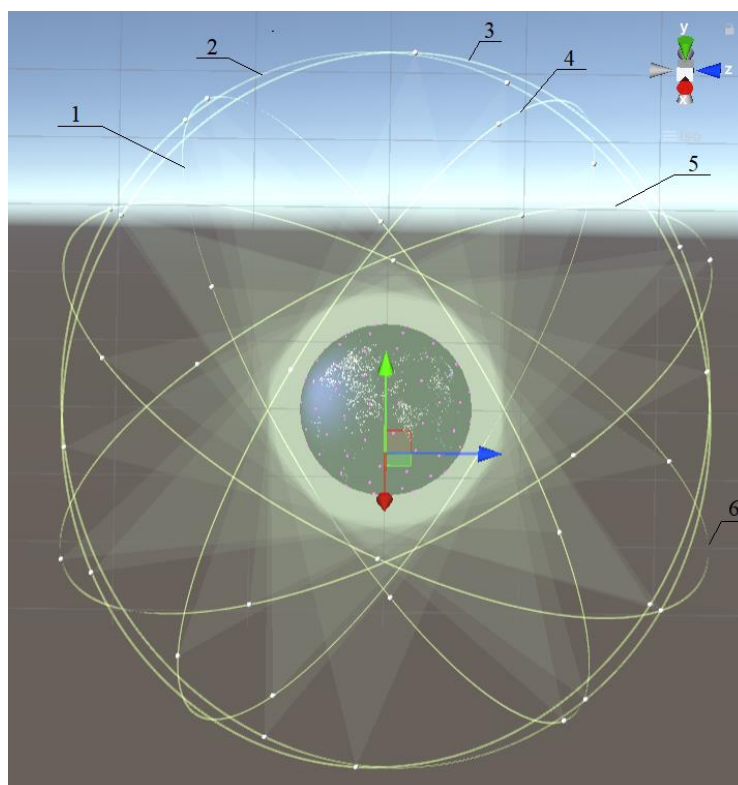


Рисунок 25 – Спутниковая группировка GPS

## 2.10 Определение зоны радиопокрытия

На рисунках выше видно, что вокруг Земли образуется радиополе до определенной высоты (рис. 26).

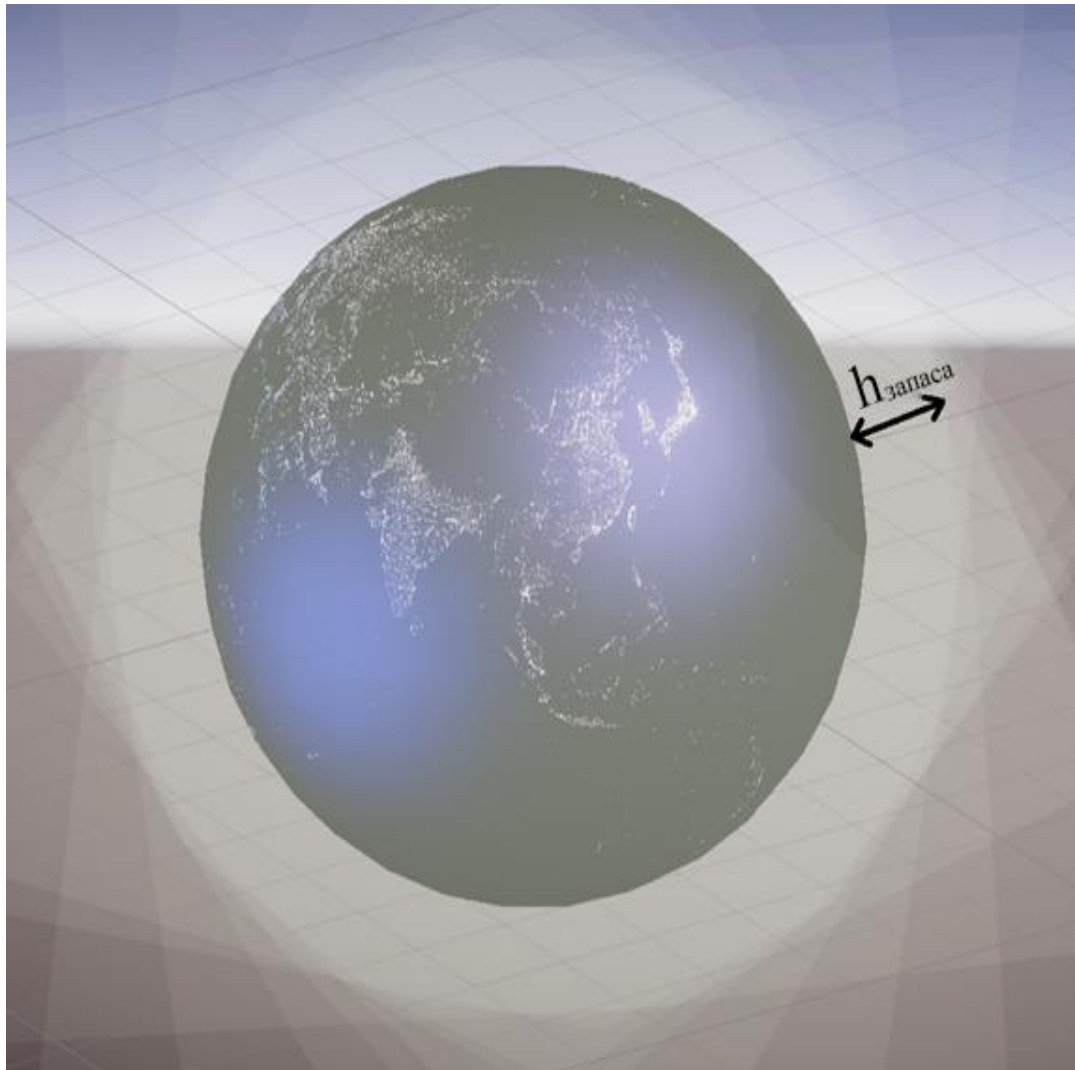


Рисунок 26 – Радиополе вокруг Земли

Вычислим ее. Радиус радиоконуса  $R$  с шириной диаграммы направленности  $19^\circ$  и высотой  $h$  равен

$$R = tg(19^\circ) * h.$$

Вычтем из этой величины радиус Земли и получим запас высоты:

$$h_{\text{запаса}} = tg(19^\circ) * h - 6371. \quad (2)$$

Определим характеристики для каждой спутниковой конфигурации (табл. 2): сколько в среднем видно спутников с Земли; коэффициент эффективности по формуле (1); запас высоты радиовидимости по формуле (2).

Таблица 2 – Характеристики спутниковых конфигураций различных СНС

Название СНС	Запас высоты радиовидимости	Кол-во спутников	Число видимых НКА	Коэффициент эффективности
ГЛОНАСС	2400 км	24	12,21	50,86%
GPS	2778 км	32	18,31	50,86%
Galileo	3818 км	30	15,27	50,91%

Все рассмотренные СНС являются глобальными и оперативными, количество спутников, видных в любой момент времени, гораздо больше необходимых четырех. Это увеличивает точность геолокации.

Запас высоты радиовидимости также очень высок и составляет несколько тысяч километров, в то время как воздушные суда летают на высоте около 11 километров.

По эффективности все три системы оказались очень близки: разница между Глонасс и GPS составляет меньше сотых процента. Чуть лучше результат у СНС Galileo, ее результаты моделирования на 0,05% лучше остальных СНС.

## 2.11 Исследование других конфигураций

Возникает вопрос, можно ли еще больше улучшить конфигурацию спутников и добиться большей эффективности. Для этого проведем множество моделирований на основе СНС Galileo, изменяя по одному разные параметры.

Сильнее всего от своих аналогов Galileo отличается высотой орбиты, поэтому начнем с нее. Составим график зависимости эффективности от высоты орбиты (рис. 27), изменяя высоту от 1000 до 37000 км с шагом 1000 км. Если не выполняется требование оперативности, значение принимается за ноль.

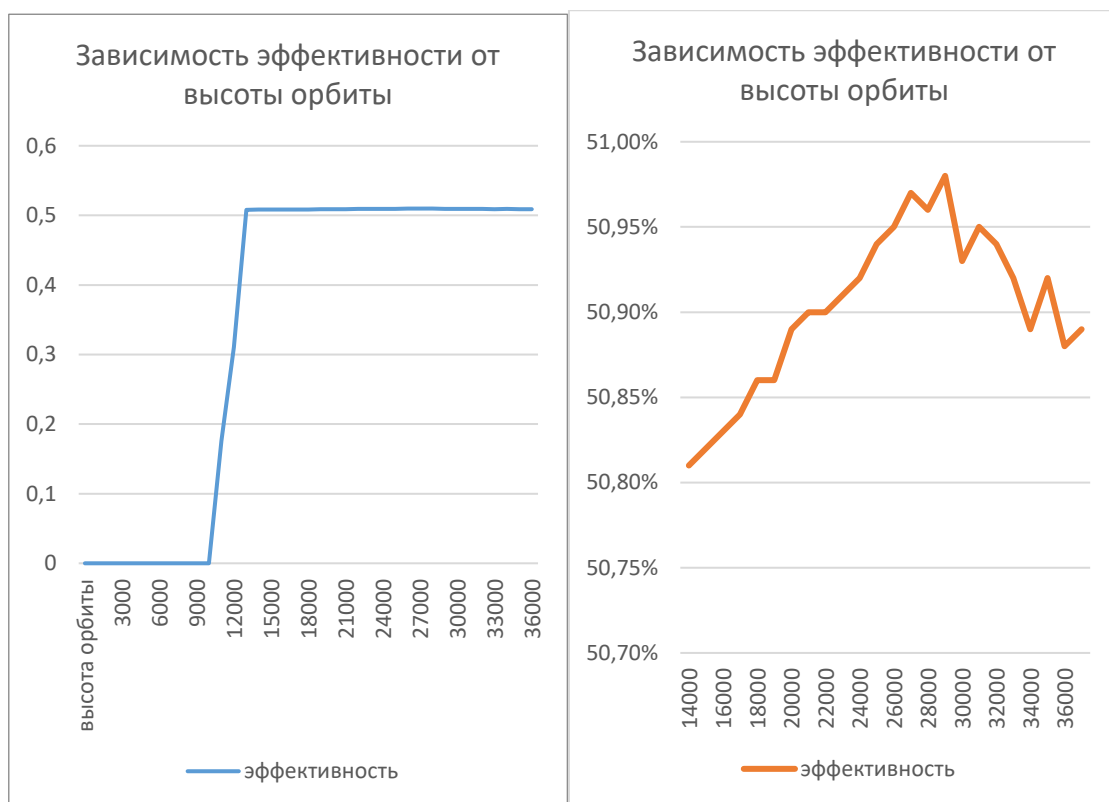


Рисунок 27 – График зависимости эффективности от высоты орбиты

На графике видим, что эффективность резко возрастает после высоты 12000 км, после чего упирается в некий потолок. Максимум достигается на высоте 29000 км и составляет 50,98%, что на 0,07% больше, чем у СНС Galileo.

Далее исследуем зависимость коэффициента эффективности от угла наклона (рис. 28) на новой высоте.



Рисунок 28 – График зависимости эффективности от угла наклона

При наклонении  $35^\circ$  достигается максимальная эффективность в 51,04%.

Далее исследуем зависимость коэффициента эффективности от количества спутников на орбите (рис. 29) с новым наклонением.



Рисунок 29 – График зависимости эффективности от количества спутников на орбитах

Максимальная эффективность достигается при 10 спутниках на орбите. При таком последовательном подходе удалось улучшить эффективность конфигурации на 0,13% по сравнению с Galileo, увеличив высоту и уменьшив наклонение.

Проведем аналогичные исследования на базе конфигурации GPS. Зависимость эффективности от высоты (рис. 30):



Рисунок 30 – График зависимости эффективности от высоты орбиты

Самое большое значение определяется при высоте 36000 км. Далее исследуем зависимость коэффициента эффективности от угла наклонения (рис. 31) на новой высоте:



Рисунок 31 – График зависимости эффективности от угла наклонения

Наклонение в  $35^\circ$  снова приходится на максимум. Далее исследуем зависимость коэффициента эффективности от количества спутников на орбите (рис. 32) с новым наклонением:



Рисунок 32 – График зависимости эффективности от количества спутников на орбитах

На графике получаем два максимума: на 6 и на 13 спутниках на каждой орбите. Лучшим решением будет выбрать 6, поскольку при 13 спутниках потребителям доступно более 40 НКА каждый момент времени, появляется избыточная точность при таких же больших затратах.



В итоге получилось улучшить значение эффективности GPS на 0,27%, уменьшив угол наклона и увеличив радиус орбиты. Полученное значение 51,13% является рекордом среди имевшихся, но все равно отличается от оригинала на десятые доли процентов. Поэтому можно сделать вывод, что все существующие СНС имеют максимальную и сопоставимую эффективность.

## 2.12 Внедрение в учебный процесс

Предлагается создание и внедрение лабораторной или практической работы для студентов на основе моей работы. В ходе выполнения такой работы им нужно будет скачать Unity и мой проект, а затем самостоятельно проверить характеристики существующих СНС и исследовать другие конфигурации, меняя соответствующие параметры. Далее изложен ход работы:

1. Установить среду разработки Unity по ссылке (рис. 33):  
<https://unity.com/ru/download>.

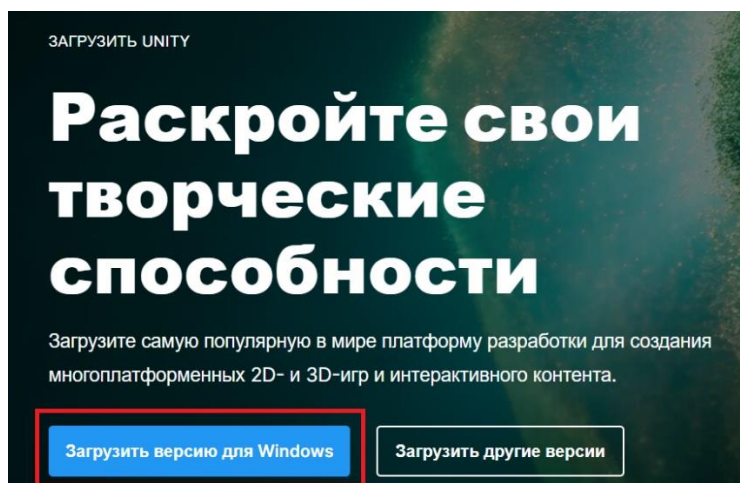


Рисунок 33 – Загрузка установщика Unity

2. Скачать готовый проект по ссылке (рис. 34):  
<https://github.com/PelMRK/Navigation-Sattelite-System-Simulator>.  
Для этого нажать зеленую кнопку «Code», затем «Download ZIP».

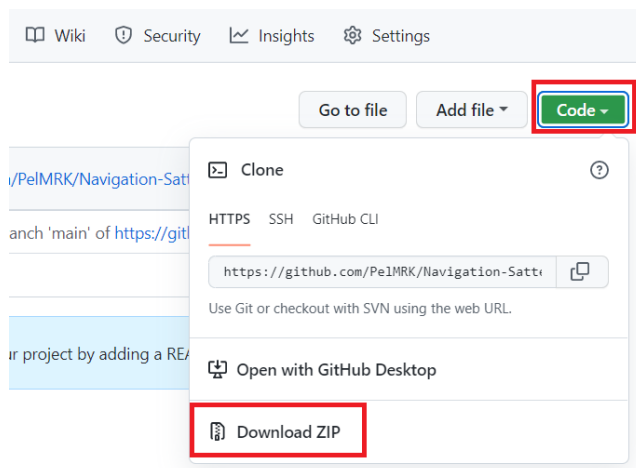


Рисунок 34 – Загрузка готового проекта симулятора

3. Найти и открыть приложение Unity Hub. Создать новый 3D-проект: кнопка «New project», выбрать «3D Core», «Create project» (рис. 35).

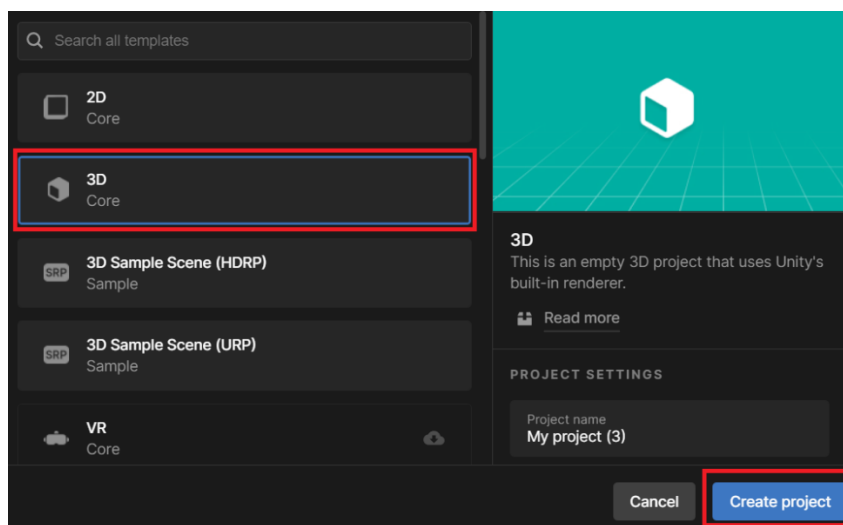


Рисунок 35 – Создание нового 3D проекта

4. Открыть свойства появившегося проекта, нажать «Show in explorer» (рис. 36). Найти в скачанном архиве папки: «Assets», «Packages», «ProjectSettings». Скопировать их с заменой в папку «My project» нового проекта (рис.37). Запустить проект через Unity Hub, нажав на него.

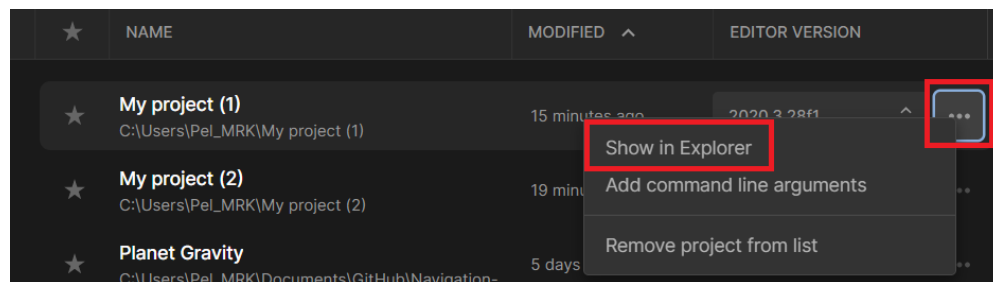


Рисунок 36 – Открытие папок нового проекта

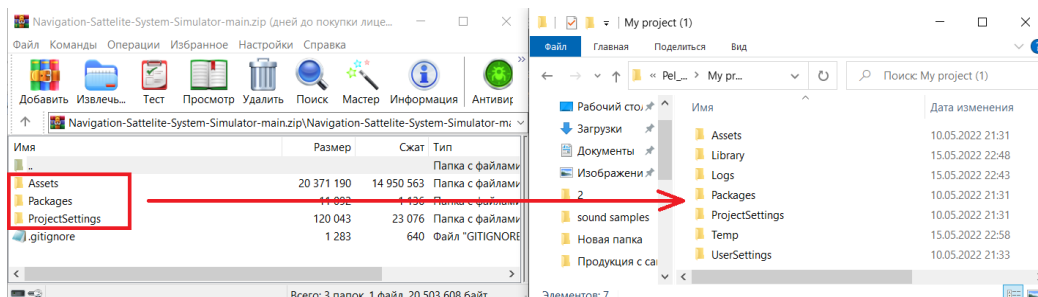


Рисунок 37 – Копирование скачанных папок в новый проект

5. В разделе файлов проекта «Project» (внизу) в папке «Assets» выбрать шаблон СНС «Galileo», «GLONASS» или «GPS», кликнув по нему два раза (рис. 38). Запустить симуляцию по кнопке запуска вверху и перейти во вкладку «Scene» рядом (рис. 39). Открыть консоль (вкладка «Console» внизу) и прочитать полученные данные.

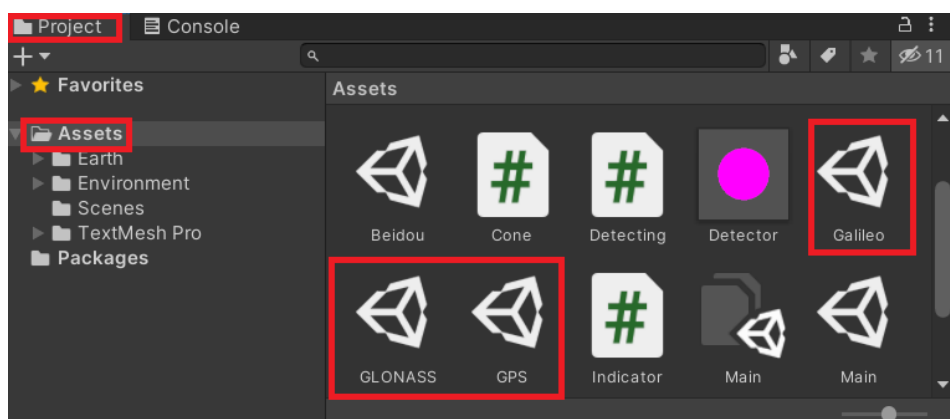


Рисунок 38 – Выбор шаблона спутниковой группировки

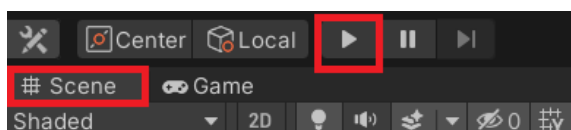


Рисунок 39 – Запуск симуляции

6. Самостоятельно провести собственное исследование: изменяя соответствующие параметры объектов «Orbit», описанные в бакалаврской работе, добиться улучшения характеристик существующих СНС, повышая коэффициент эффективности, выводящийся в процессе моделирования в последней строке вывода консоли.

## Заключение

Создан симулятор спутниковых навигационных систем, позволяющий задать любое количество спутников, орбит, их положение в пространстве и радиус, а также измерить несколько характеристик полученной конфигурации спутников: число видимых НКА из каждой точки с Земли; среднее количество видимых НКА; коэффициент эффективности группировки. На основе программы разработана и предложена лабораторная работа для студентов для внедрения в учебный процесс.

Зона радиовидимости простирается до нескольких тысяч километров над поверхностью Земли. Воздушные суда летают на высоте около 11 км, поэтому им доступны услуги СНС для точного определения местоположения на всех этапах: руление, взлет, полет по маршруту, посадка.

В ГЛОНАСС для любой точки земного шара в зоне радиовидимости находятся по 12 спутников, в GPS – 18, в Galileo – 15. Эти значения гораздо больше необходимого минимума в 4 спутника, что обеспечивает большую точность, а также обеспечивает условия глобальности и оперативности.

Все СНС достигают предела своей эффективности при значении коэффициента в районе 51%, после чего путем изменения различных параметров идет «борьба» за каждую сотую долю процента, что очень мало. Так, у ГЛОНАСС и GPS этот показатель составил 50,86%, у Galileo – 50,91%.

В ходе исследований удалось найти конфигурацию с наибольшим коэффициентом 51,13%. Ее параметры: высота орбиты 36000 км; наклонение 35°; количество спутников на орбите 6; количество орбит 6.

Таким образом все существующие СНС, а также различные их вариации имеют приблизительно одинаковый уровень эффективности, стремящийся к некой асимптоте на уровне 51-52%. И дальнейшее развитие СНС следует ожидать скорее от модернизации самих НКА, идти путем интенсивного развития, который выведет технологии на новый уровень.

## Список использованных источников

1. Автоматизированные системы управления воздушным движением. Новые информационные технологии в авиации: Учеб. пособие / Р. М. Ахметов, А. А. Бибутов, А. В. Васильев и др.; Под ред. С. Г. Пятко и А. И. Красова. – СПб.: Политехника, 2004. – 446 с.
2. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. – Текст: электронный // Прикладной потребительский центр Роскосмоса. – URL: <https://www.glonass-iac.ru/> (дата обращения: 15.05.2022).
3. ГОСТ Р 52928-2010. Система спутниковая навигационная глобальная. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
4. Документация с официального сайта Unity. – Режим доступа: <https://docs.unity3d.com/ru/530/Manual/> (дата обращения: 15.05.2022).
5. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцевич и др.; Под ред. В. С. Шебшаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
6. R. F. C. Vessot et al. Relativity in the Global Positioning System // Living Reviews in Relativity : journal. — 2003. — Vol. 6. — P. 1—42. – URL: <https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-2003-1> (дата обращения: 05.06.2022).

## Приложение А – Моделирование гравитации

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class Attractor : MonoBehaviour
{
    // Скорость воспроизведения: 20 реальных минут в каждой секунде моделирования
    readonly float M1_M2_G_km = 573968442240000f; // M1 * M2 * G (20min, km); M
    спутника = 1000 кг
    GameObject[] celestials;

    float Cos(float angle)
    {
        var deg = angle / 180 * Mathf.PI;
        return (float)System.Math.Cos(deg);
    }

    float Sin(float angle)
    {
        var deg = angle / 180 * Mathf.PI;
        return (float)System.Math.Sin(deg);
    }

    void Start()
    {
        celestials = GameObject.FindGameObjectsWithTag("Celestial");
    }

    private void FixedUpdate()
    {
        Gravity();
        // Вращаем Землю
        transform.Rotate(0, -5.0137f * Time.deltaTime, 0); // 5 градусов в секунду
    }

    void Gravity()
    {
        foreach(GameObject a in celestials)
        {
            // Сообщаем всем спутникам Силу притяжения Земли
            float r = Vector3.Magnitude(a.transform.position);
            a.GetComponent<Rigidbody>().AddForce((- a.transform.position).normalized
            * M1_M2_G_km / (r * r));
        }
    }
}
```

## Приложение Б – Моделирование радиоконуса

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class Cone : MonoBehaviour
{
    Mesh mesh;

    List<Vector3> vertices;
    List<int> triangles;

    Vector3 pos;
    private float origin;
    private float height;
    private float radius;
    private int segments = 10;
    private float degrees = 19f; //19 градусов у спутников в настоящем (ширина
конуса радиосигнала) (ширина диаграммы направленности)

    float angle;
    float angleAmount;

    void Start()
    {
        mesh = new Mesh();
        GetComponent<MeshFilter>().mesh = mesh;
        origin = Vector3.Magnitude(transform.position);
    }

    void Update()
    {
        transform.rotation = Quaternion.LookRotation(transform.position);

        vertices = new List<Vector3>();
        pos = new Vector3();

        angleAmount = 2 * (float)System.Math.PI / segments;
        angle = 0.0f;

        vertices.Add(Vector3.zero);
        vertices.Add(new Vector3(0, 0, -origin));

        for (int i = 0; i < segments; i++)
        {
            height = Vector3.Magnitude(transform.position);
            radius = Mathf.Tan((degrees * (Mathf.PI)) / 180) * height;

            pos.x = radius * Mathf.Sin(angle);
            pos.y = radius * Mathf.Cos(angle);
            pos.z = height;

            vertices.Add(new Vector3(-pos.x, -pos.y, -pos.z));

            angle += angleAmount;
        }

        mesh.vertices = vertices.ToArray();
    }
}
```



## Окончание приложения Б

```
triangles = new List<int>();
for (int i = 2; i < segments + 1; i++)
{
    triangles.Add(0);
    triangles.Add(i);
    triangles.Add(i+1);
}

triangles.Add(0);
triangles.Add(2);
triangles.Add(segments + 1);

mesh.triangles = triangles.ToArray();
GetComponent<MeshCollider>().sharedMesh = mesh;
}
```

## Приложение В – Моделирование детектора сигналов

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class Detecting : MonoBehaviour
{
    public int number = 0;
    List<Collider> triggerList = new List<Collider>();

    private void OnTriggerEnter(Collider other)
    {
        if (!triggerList.Contains(other))
        {
            triggerList.Add(other);
        }
    }

    private void OnTriggerExit(Collider other)
    {
        if (triggerList.Contains(other))
        {
            triggerList.Remove(other);
        }
    }

    void FixedUpdate()
    {
        number = triggerList.Count; // this gives the number of visible satellites
        triggerList.Clear();
    }
}
```

## Приложение Г – Сбор данных и расположение детекторов

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class Indicator : MonoBehaviour
{
    int sat_amount = 0;
    int det_amount = 0;

    int tot_sum_nums = 0;
    int sum_det_amnt = 0;

    int Summ(List<int> nums)
    {
        int summ = 0;
        foreach (int el in nums)
        {
            summ += el;
        }
        return summ;
    }

    float Sin(float angle)
    {
        var deg = angle / 180 * Mathf.PI;
        return (float)System.Math.Sin(deg);
    }

    float Cos(float angle)
    {
        var deg = angle / 180 * Mathf.PI;
        return (float)System.Math.Cos(deg);
    }

    float Sqrt(float number)
    {
        return (float)System.Math.Sqrt(number);
    }

    public Transform objEarth; // для объекта-Земли
    public Transform pointPrefab; // для объекта-детектора
    public float radius = 6371f; // радиус расположения детекторов
    public int detNumber = 6; // количество детекторов
    public float size = 200f; // размер детектора

    void Awake()
    {
        Vector3 scale = Vector3.one * size;
        Vector3 position;
        // Равномерное расположение детекторов по сфере Земли по решётке Фибоначчи
        for (float i = 0f; i < (float)detNumber; i += 1f)
        {
            float goldenRatio = (1f + Sqrt(5f)) / 2f;

            float phi = (float)System.Math.Acos(1f - 2f * (i + 0.5f) /
(float)detNumber);
            float theta = 2 * Mathf.PI * i * goldenRatio;
```

## Окончание приложения Г

```
// Создаем клон детектора
    Transform point = Instantiate(pointPrefab);
    position.x = radius * (float)System.Math.Cos(theta) *
(float)System.Math.Sin(phi);
    position.y = radius * (float)System.Math.Sin(theta) *
(float)System.Math.Sin(phi);
    position.z = radius * (float)System.Math.Cos(phi);
    point.localPosition = position;
    point.localScale = scale;
    point.transform.parent = objEarth.transform;
}
}

void Start()
{
    foreach (GameObject a in GameObject.FindGameObjectsWithTag("Celestial"))
    {
        sat_amount += 1; // Получаем общее количество спутников
    }
    foreach (GameObject a in GameObject.FindGameObjectsWithTag("Detectors"))
    {
        det_amount += 1; // Получаем общее количество детекторов
    }
}

void FixedUpdate()
{
    var nums = new List<int>(); // Список количеств видимых спутников с каждого
детектора
    foreach (GameObject a in GameObject.FindGameObjectsWithTag("Detectors"))
    {
        int num = a.GetComponent<Detecting>().number; // Получаем число видимых
спутников от каждого детектора
        nums.Add(num);
    }

    float avr = (float)Summ(nums) / nums.Count; // Среднее количество видимых
спутников в данный момент времени
    if (avr > 1)
    {
        tot_sum_nums += Summ(nums);
        sum_det_amnt += det_amount;
        float general_avr = (float)tot_sum_nums / (float)sum_det_amnt; //
Среднее количество видимых спутников в среднем за всё время
        float efficiency = general_avr / sat_amount * 100; // Показатель
эффективности системы. Чем больше, тем лучше
        Debug.Log(string.Join(", ", nums));
        print(general_avr + " - среднее количество видимых спутников за всё
время");
        print(efficiency + "% - часть спутников, всегда видимых с Земли");
    }
}
}
```

## Приложение Д – Моделирование орбит и расположение спутников

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class Orbit : MonoBehaviour
{
    float Sin(float angle)
    {
        var deg = angle / 180 * Mathf.PI;
        return (float)System.Math.Sin(deg);
    }

    float Cos(float angle)
    {
        var deg = angle / 180 * Mathf.PI;
        return (float)System.Math.Cos(deg);
    }

    float Sqrt(float number)
    {
        return (float)System.Math.Sqrt(number);
    }

    public Transform pointPrefab;
    public float radius = 20000; // радиус орбиты
    public int satNumber = 8; // количество спутников
    public float A = 0.1f; // A, B, C – координаты вектора-нормали к плоскости
орбиты
    public float B = 0.1f;
    public float C = 0.1f;
    public float phase = 0; // начальная фаза

    void Awake()
    {
        Vector3 scale = Vector3.one * 400f; // размеры спутника в км (диаметр)
        Vector3 position;

        for (float t = 0 + phase; t < 360 + phase; t += 360 / satNumber)
        {
            float x = radius / Sqrt(A * A + C * C) * (C * Cos(t) - A * B *
Sin(t) / Sqrt(A * A + B * B + C * C));
            float y = radius * Sqrt(A * A + C * C) / Sqrt(A * A + B * B + C
* C) * Sin(t);
            float z = - radius / Sqrt(A * A + C * C) * (A * Cos(t) + B * C *
Sin(t) / Sqrt(A * A + B * B + C * C));

            // Создаем клон спутника
            Transform point = Instantiate(pointPrefab);
            position.x = x;
            position.y = y;
            position.z = z;
            point.localPosition = position;
            point.localScale = scale;

            // Задаём всем спутникам начальную орбитальную скорость

```

## Окончание приложения Д

```
float v = Sqrt(9.80665f / 1000 * 3600 * 20 * 20 * 6371 * 6371 /
radius); // вместо G*Mз пишу g*Rз*Rз чтобы работать не с большими числами
Vector3 vect0 = point.transform.position;
Vector3 vectA = UnityEngine.Vector3.Cross(vect0, Vector3.right);
Vector3 vectB = UnityEngine.Vector3.Cross(vect0, Vector3.up);
Vector3 vectC = UnityEngine.Vector3.Cross(vect0,
Vector3.forward);
Vector3 vectAA = UnityEngine.Vector3.Cross(vect0, Vector3.left);
Vector3 vectBB = UnityEngine.Vector3.Cross(vect0, Vector3.down);
Vector3 vectCC = UnityEngine.Vector3.Cross(vect0, Vector3.back);
Vector3 vect90 = (vectA*A - vectAA*A + vectB*B - vectBB*B +
vectC*C - vectCC*C).normalized * v;
point.GetComponent<Rigidbody>().velocity = vect90;
    }
}
}
```