Думаю, понятнее будет, если читать в таком порядке:

Репортаж; Рисунки с СО, системой координат и секторами работы паруса; Этот отчёт; Картинки в экселе (да, к сожалению, опять эксель); Код cpp - в нём очень много комментариев. В основном код от первой задачи. Думаю, в нём всё понятно, кроме одного самого важного куска с алгоритмом управления парусом, о нём ниже отдельно. Состоит из костылей, поэтому запутан. Долго подбирал.

Программу можно собрать в двух вариантах: с #define NOMOON в 19 строке, тогда Луна исключается и будет расчёт без учёта её массы, и в СО Земли. Или без этого дефайна, как в репозитории, тогда идёт нормальный расчёт в СО барицентра Земля-Луна и с учётом массы Луны. Считаю с шагом по времени DT = 5 секунд, время счёта получилось 3 минуты. Программа работает только с этим DT, иначе немного другие погрешности, и такая траектория парусника, при которой он пролетает мимо Луны и делает гравитационный манёвр, не получается.

В ответ вышло: сделано витков = 1536 до покидания Капитаном парусника; полётное время 13199 дней. Расстояние от апогея последнего витка до целевой орбиты 602 603 км.

Результат счёта программы в варианте NOMOON тоже оставил в итоговой эксельке для вида, но смысл задачи, как я понял, не в этом.

Система отсчёта приведена на рисунке. Чтобы перейти в неё из первой задачи, перенёс оттуда в виде констант два числа с нулевой точки (где φ = 0): расстояние от ракеты до центра Земли x0 и скорость v0. Начальное положение: Земля, парусник и Луна находятся на одной прямой на оси ОХ.

Другие рисунки поясняют систему координат, введённые переменные, и схема к алгоритму управления парусом.

Траекторию всего полёта выводить не стал, слишком много точек, нереально. Вывожу только последний виток. Но на каждом пятом витке вывожу в репорт апогей, перигей, максимальную и минимальную скорости, и на какой угол φmax приходится апогей.

Непонятный кусок программы с 218 по 271 строки нужно объяснить. Здесь алгоритм управления парусом, долго подбирал его. Это правило мне рассказал Капитан Серый Крыс, которого я попросил проконсультировать меня по полётам на солнечном парусе. Да, да, тот самый, который совершил этот легендарный полёт на «Черепе». Мы сидели с ним в воскресенье 14.11.2021 вечером в Маке у самолёта. Серый раскатал передо мной на столе пару измятых листов экселя, придавил один из них своей фуражкой с перекрещенными серебряными эллипсами, другой напёрстком колы, и водя жёлтым когтем по линиям начал рассказ. Передаю его совершенно буквально.

\* \* \*

Первые 500 витков я просто разгонял яхту, для этого на каждом витке открывал парус на угле φ\_open = -125° и закрывал на φ\_close = -35°. Орбита ожидаемо постепенно вытягивалась, но не по оси OY, как если бы не было Луны, а немного заваливалась на направление φ\_max = 110°.

Дальше получилась такая ситуация, что перигей постепенно приближался к Земле. Скорость в перигее выросла до четырёх тысяч, я почувствовал, что ещё немного, и могу врезаться в Землю на огромной скорости. В этот момент мне так захотелось вернуться домой, но я понял, что если буду тормозить в апогее, то орбита вытянется ещё сильнее и я точно врежусь. Обратного пути нет! Крысиная ловушка? Похоже. Но тут я заметил, что ось орбиты сама собой медленно поворачивается в направлении вращения Луны, то есть против часовой стрелки. Значит нужно лечь в дрейф - полностью убрать парус, и ждать пока орбита не повернётся апогеем вниз, и в этот момент постараться подтолкнуть парусник уже в апогее. Поэтому на 500 витке я придумал такое правило, довольно сложное:

- если апогей φ\_max в нижнем секторе - от -110° до -70°, то немножко открываю парус, в очень узком интервале от φ\_open = -97° до φ\_close = -83°. Больше нельзя, иначе солнечный ветер очень быстро разворачивает орбиту в направлении оси OX. Так постепенно поднимал перигей и округлял орбиту.

- если апогей в верхнем секторе – от 70° до 110°, а также при условии, что перигей r\_min не ниже 20 тысяч км, и апогей r\_max не выше 300 тысяч км, то могу ещё безопасно разогнаться – тогда открываю парус в интервале от φ\_open = -135° до φ\_close = -45°. Ограничение на апогей поставил потому, что если залететь за магическую черту 300 – 320 тысяч км, то парусник утягивается далеко за орбиту Луны. Этот факт просто обнаружил методом проб и ошибок.

- если же апогей не попадает ни в один из этих двух секторов, то просто сворачиваю парус и дрейфую в ожидании нужного поворота оси орбиты.

Когда это правило включилось на n = 501 витке, моя естественная нейронная сеть увидела, что ещё есть запас по перигею, и я доразгонал парусник ещё. На 600 витке получилась орбита с апогеем 260 тыс км, перигеем 50 тыс км, апогей находится на угле φ\_max примерно 109°. На каком-то витке сработал один из ограничителей правила, и я положил яхту в дрейф по лёгкой волне, наблюдая, как Луна постепенно поворачивает мою орбиту. Да, в перигее потряхивало.

На 990 витке апогей вошёл в нижний сектор, и я короткими открытиями паруса в апогее пытался округлить орбиту. Открывал ненамного, только с -97° до -83°. И знаешь, что тебе скажу? Я сам не понял как так быстро и плавно всё произошло. «Череп» резко подняло, орбита быстро крутнулась в φmax = +90°, мгновенно включилось правило для верхнего сектора на разгон апогея, я работал не покладая лап поднимая и убирая парус, и когда в какой-то момент сработал ещё один ограничитель, а именно, когда одновременно и апогей r\_max превысил 250, и перигей r\_min 150, я убрал парус, чтобы предотвратить раскачку и неконтролируемый разгон.

Орбита тут же перешла в лёгкую зыбь, вращение её оси теперь развернулось в противоположную сторону и стало явно быстрее. Я наконец-то смог перевести глаза на счётчик, и увидел, что на нём n = 1090 витков. Весь этот переход длился всего лишь 100 витков. Перигей поднялся до 160 тысяч, хотя потряхивало его неслабо, а апогей достиг чёртовых 320! Ты представляешь? Луна находится на отметке 380, совсем рядом!

Я поставил нейронке флаг «1000 витков до конца полёта» (nmax = n + 1000), убрал парус и лёг в дрейф чтобы протестировать окончательно получившуюся орбиту, и всё шло нормально. Орбита казалась устойчивой, если не считать, что она постоянно пульсировала и ось эллипса поворачивалась по часовой стрелке, но чёрт меня дёрнул, когда до конца полёта оставалось каких-то 570 – 565 витков, захотел поднять парус для разгона в перигее опять. Ты понимаешь, хотелось подлететь к Луне поближе, она была видна в иллюминатор так близко! Но это вскоре привело к катастрофе. На счётчике витков было 1440. Всего лишь шесть бустов - маленьких ускоряющих импульсов, парус открывал только в секторе от -95° до -85° – всего лишь на 10 градусов на витке. После 1445 витка, когда я опять, уже точно окончательно, лёг в дрейф, апогей немного подрос, с 320 до 330, и сначала казалось, что всё по-прежнему спокойно, а потом, на 1490 витке, когда Луну было видно лучше всего, пришла она.

Такой волны я в жизни больше не видел, и никакому крысолову не пожелаю. До 1500 витка меня мотало по всей вселенной, долетал до отметки 1644, ты представляешь? Полтора миллиона вёрст от Земли! На 1510 витке всё, казалось, успокоилось, но на 1520 опять выбросило за отметку 800. Потом на 1525 витке опять всё спокойно, а на 1530 заброс на 1454. Моя нейронка не выдержала, на 1535 витке я нажал красную кнопку записи траектории последнего витка в orbit.csv и на 1536 покинул «Череп». Это была славная посудина, никто теперь не знает где он одиноко скитается в глубинах космоса. А меня подобрал случайно пролетавший рядом Старшип от Илона Маска.

Лунная орбита – страшное место, если у тебя ограничена манёвренность. Клянусь своим потерянным хвостом, ни один парусник не сможет долететь до Луны, если только он не ищет верной гибели. Двигатель всё-таки нужен. На парусе ты можешь подняться самое большее примерно до апогея 300 тысяч км и перигея 150 тысяч, дальше не советую, опасно.

\* \* \*

- Вот, посмотри мою траекторию. - Крыс провёл когтем по зелёной линии и остановился на резком изгибе прямо на её пересечении с орбитой Луны. – Это она даёт такие волны. Видишь, как крутнуло? Перегрузка была страшная, ты даже представить себе не можешь. А вот посмотри на увеличенное изображение. Я пролетал так близко от Луны, что было видно все камни на её поверхности. Обрати внимание на точки на траектории – они идут с интервалом DT = 5 секунд. Какая скорость у меня была, и как Луна затормозила «Череп».

Он посмотрел в окно на жёлтую половинку Луны, отхлебнул из напёрстка и задумался о своём.

- Как же близко от неё я был! И как мне повезло! В тот день Святой Юрий и Святой Нейл были со мной. – Крыс достал из кармана кителя миниатюрный брелок, на котором я увидел с одной стороны фотографию Юрия Гагарина, а с другой Нейла Армстронга. Покрутил, и тут же спрятал обратно.

- Вот скажи, Капитан - спросил я, – твой парус мог открываться только в одном направлении, по Солнцу. А если бы ты мог ставить его под углом, то получилось бы лучше?

- Ты не понимаешь, это физика. Тяга паруса слишком мала по модулю, а тебе нужно подровнять свою скорость к орбитальной скорости Луны, когда выйдешь на её орбиту. Нужен резкий импульс, без этого в принципе никак. Sad, but true.

- А где ты потерял свой хвост? – вдруг решился я на бестактный вопрос.

- Там же, на «Черепе». «Хвостовая рекурсия», говорили они. «Закон сохранения вещества», говорили они. «Ешь его, и он отрастёт снова». Эти негодяи из МГТУ меня тупо использовали как крысу, а я так мечтал о высоком.