

Математическое моделирование

Лабораторная работа № 2

Гафоров Нурмухаммад

Содержание

1	Цель работы	6
2	Задание	7
3	Выполнение лабораторной работы	8
3.1	Условие задачи	9
4	Полярные траектории: катер (ODE) и лодка (аналитически)	11
4.1	Инициализация проекта и загрузка пакетов	11
4.2	Параметры задачи	12
4.3	Определение модели	12
4.4	Запуск 1: $r_0 = s/(n+1)$, $t \in (1e-9, 8)$	14
4.5	Запуск 2: $r_0 = s/(n-1)$, $t \in (1e-9, 15)$	14
5	Параметрическое исследование: катер (ODE) и лодка (аналитически) в полярных координатах	16
5.1	Активация проекта и загрузка пакетов	16
5.2	Определение модели	17
5.3	Определение параметров в Dict	17
5.4	Функция-обертка для запуска одного эксперимента	18
5.5	Запуск базового эксперимента (кэширование)	20
5.6	Визуализация базового эксперимента	21
5.7	Второй базовый эксперимент (как у тебя во 2-й части): case=:minus, tmax=15	22
5.8	Параметрическое сканирование	23
5.9	Запуск всех экспериментов и сбор результатов	24
5.10	Анализ и визуализация результатов сканирования	26
5.11	Бенчмаркинг с разными параметрами	28
5.12	Сохранение всех результатов	30
5.13	Анализ результатов моделирования	31
5.14	Базовые эксперименты	32
5.15	Параметрическое сканирование по n	34
5.16	Анализ метрики scale_ratio	35
5.17	Время вычислений	36
6	Выводы	37

Список иллюстраций

5.1	Базовый эксперимент (case=plus)	32
5.2	Базовый эксперимент (case=minus)	33
5.3	Сканирование траекторий катера	34
5.4	Зависимость scale_ratio от n	35
5.5	Зависимость времени вычисления от n	36

Список таблиц

1 Цель работы

Рассматривается пример построения математической модели, предназначенной для выбора рациональной стратегии в задаче преследования.

Пусть катер береговой охраны в условиях тумана преследует лодку браконьеров. В некоторый момент видимость восстанавливается, и лодка фиксируется на расстоянии k км от катера. Затем цель вновь исчезает из поля зрения и продолжает движение по прямой в неизвестном направлении.

Известно, что скорость катера в n раз превышает скорость лодки. Требуется определить такую траекторию движения катера, которая гарантирует его встречу с лодкой.

2 Задание

1. Выполнить аналитические рассуждения и получить систему дифференциальных уравнений при условии, что скорость катера больше скорости лодки в n раз.
2. Построить траектории движения катера и лодки для двух вариантов начальных условий.
3. По графикам определить точку их пересечения.

3 Выполнение лабораторной работы

Положим $t_0 = 0$. В момент обнаружения лодки примем её положение за начало координат: $x_0 = 0$. Катер в этот же момент находится на расстоянии k от неё.

Переходим к полярной системе координат. Полусом выбираем точку обнаружения лодки, а полярную ось направляем через текущее положение катера.

Определим расстояние x , после достижения которого катер должен изменить характер движения. Пусть через время t обе точки находятся на одинаковом расстоянии x от полюса. За это время лодка проходит путь x , а катер — $x - k$ либо $x + k$ в зависимости от начальной конфигурации.

Время движения для лодки равно $\frac{x}{v}$, для катера — $\frac{x+k}{nv}$ или $\frac{x-k}{nv}$. Поскольку момент совпадает, получаем равенства:

- $\frac{x}{v} = \frac{x+k}{nv},$
- $\frac{x}{v} = \frac{x-k}{nv}.$

Решая их, находим два возможных значения начального радиуса:

$$x_1 = \frac{k}{n+1}, \quad \theta_0 = 0,$$

$$x_2 = \frac{k}{n-1}, \quad \theta_0 = -\pi.$$

После выхода на одинаковый радиус катер должен поддерживать ту же радиальную скорость, что и лодка, одновременно совершая вращательное дви-

жение вокруг полюса.

Разложим скорость катера на составляющие:

- радиальная: $v_r = \frac{dr}{dt}$,
- тангенциальная: $v_\tau = r \frac{d\theta}{dt}$.

Требуем $v_r = v$. Полная скорость катера равна nv , следовательно,

$$v_\tau = \sqrt{(nv)^2 - v^2} = v\sqrt{n^2 - 1}.$$

Отсюда получаем систему:

$$\begin{cases} \frac{dr}{dt} = v, \\ r \frac{d\theta}{dt} = v\sqrt{n^2 - 1}. \end{cases}$$

Начальные условия:

$$\begin{cases} \theta_0 = 0, \\ r_0 = \frac{k}{n+1}, \end{cases}$$
$$\begin{cases} \theta_0 = -\pi, \\ r_0 = \frac{k}{n-1}. \end{cases}$$

Исключая время, получаем уравнение траектории:

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{r}{\sqrt{n^2 - 1}}.$$

Его решение задаёт движение катера в полярных координатах.

3.1 Условие задачи

В конкретном численном примере лодка обнаруживается на расстоянии 20 км.

Скорость катера превышает скорость лодки в 5 раз, то есть $n = 5$.

Для моделирования и построения графиков использовались внешние программные модули:

4 Полярные траектории: катер (ODE) и лодка (аналитически)

Цель: построить траектории в полярных координатах для «катера» (решение ОДУ) и «лодки» (заданная прямая в декартовых координатах, переведённая в полярные).

4.1 Инициализация проекта и загрузка пакетов

```
using DrWatson
@quickactivate "project"

using DifferentialEquations
using Plots
using DataFrames
using JLD2

script_name = isempty(PROGRAM_FILE) ? "interactive" : splitext(basename(PROGRAM_FILE))
mkpath(plotsdir(script_name))
mkpath(datadir(script_name))
```

4.2 Параметры задачи

```
n = 5
s = 20
fi = 3/4 * pi

p = (n = n, s = s, fi = fi)
```

4.3 Определение модели

Катер: $dr/d\theta = r / \sqrt{n^2 - 1}$ Здесь независимая переменная — θ (мы используем t как θ , как принято в ODEProblem).

```
function cutter_ode!(dr, r, p, □)
    dr[1] = r[1] / sqrt(p.n^2 - 1)
end
```

Лодка: линия $x(t)=t$, $y(t)=\tan(fi+\pi)*t$, затем перевод в (r, θ) В Julia правильнее использовать $\text{atan}(y, x)$, чтобы угол был в верном квадранте.

```
function boat_polar(t, p)
    k = tan(p.fi + pi)
    x = t
    y = k * t
    r = hypot(x, y)           # sqrt(x^2 + y^2)
    □ = atan(y, x)
    return r, □
end
```

Утилита: генерация траектории лодки для набора t

```

function make_boat_curve(tgrid, p)
    r = VectorFloat64(undef, length(tgrid))
    ϕ = VectorFloat64(undef, length(tgrid))
    for (i, tt) in pairs(tgrid)
        ri, ϕi = boat_polar(tt, p)
        r[i] = ri
        ϕ[i] = ϕi
    end
    return r, ϕ
end

```

Утилита: один прогон (и график, и таблицы, и сохранение)

```

function run_case(case_name; r0, ϕspan=(0.0, 2pi), nϕ=10_000, tmin=1e-9, tmax=8.0, nt

```

— Катер (ODE) —

```

ϕgrid = collect(LinRange(ϕspan[1], ϕspan[2], nϕ))
prob = ODEProblem(cutter_ode!, [r0], ϕspan, p)
sol = solve(prob, Tsit5(), saveat=ϕgrid)

df_cutter = DataFrame(ϕ = sol.t, r = first.(sol.u))

```

— Лодка (аналитически) —

```

tgrid = collect(LinRange(tmin, tmax, nt))
r_boat, ϕ_boat = make_boat_curve(tgrid, p)
df_boat = DataFrame(t = tgrid, ϕ = ϕ_boat, r = r_boat)

```

— Визуализация —

```
plt = plot(sol, proj=:polar, label="катер", xlabel="", ylabel="r",
           title="Полярные траектории – $case_name", lw=2, legend=:topleft)
plot!(plt, r_boat, p_boat, proj=:polar, label="лодка", lw=2)
```

— Сохранение —

```
savefig(plt, plotsdir(script_name, "polar_$case_name.png"))
@save datadir(script_name, "data_$case_name.jld2") df_cutter df_boat p r0 rspan n

return (plt=plt, df_cutter=df_cutter, df_boat=df_boat)
end
```

4.4 Запуск 1: $r_0 = s/(n+1)$, $t \in (1e-9, 8)$

```
case1_r0 = p.s / (p.n + 1)
res1 = run_case("r0=s_div_(n+1)"; r0=case1_r0, tmax=8.0, p=p)

println("Кейс 1 – первые 5 строк (катер):")
println(first(res1.df_cutter, 5))
println("\nКейс 1 – первые 5 строк (лодка):")
println(first(res1.df_boat, 5))
```

4.5 Запуск 2: $r_0 = s/(n-1)$, $t \in (1e-9, 15)$

```
case2_r0 = p.s / (p.n - 1)
res2 = run_case("r0=s_div_(n-1)"; r0=case2_r0, tmax=15.0, p=p)
```

```
println("\nКейс 2 – первые 5 строк (катер):")
println(first(res2.df_cutter, 5))
println("\nКейс 2 – первые 5 строк (лодка):")
println(first(res2.df_boat, 5))
```

(опционально) показать последний график в интерактивной среде

```
res2.plt
```

5 Параметрическое исследование: катер (ODE) и лодка (аналитически) в полярных координатах

5.1 Активация проекта и загрузка пакетов

```
using DrWatson
@quickactivate "project"

using DifferentialEquations
using DataFrames
using Plots
using JLD2
using BenchmarkTools
```

Установка каталогов

```
script_name = splitext(basename(PROGRAM_FILE))[1]
mkpath(plotsdir(script_name))
mkpath(datadir(script_name))
```

5.2 Определение модели

Катер: $dr/d\theta = r / \sqrt{n^2 - 1}$

```
function cutter_ode!(dr, r, p, θ)
    dr[1] = r[1] / sqrt(p.n^2 - 1)
end
```

Лодка: $x=t, y=\tan(\theta+\pi)*t \rightarrow (r, \theta)$ Важно: используем $\text{atan}(y, x)$, чтобы угол был корректен по квадрантам

```
function boat_polar(t, p)
    k = tan(p.fi + pi)
    x = t
    y = k * t
    r = hypot(x, y)
    θ = atan(y, x)
    return r, θ
end
```

5.3 Определение параметров в Dict

Все параметры — в одном Dict, как в шаблоне. Здесь «case» управляет выбором r_0 : $:plus(s/(n+1))$ или $:minus(s/(n-1))$.

```
base_params = Dict(
    :n => 5,
    :s => 20,
    :fi => 3/4*pi,
```

```

:case => :plus,                # :plus или :minus
:span => (0.0, 2*pi),          # интервал по  $\phi$ 
:nphi => 10_000,              # число точек для сохранения решения катера

:tspan_boat => (1e-9, 8.0),    # интервал по  $t$  для лодки
:nt_boat => 1_000,            # число точек для лодки

:solver => Tsit5(),
:experiment_name => "base_experiment"
)

println("Базовые параметры эксперимента:")
for (key, value) in base_params
    println(" $key = $value")
end

```

5.4 Функция-обертка для запуска одного эксперимента

Возвращаем Dict со строковыми ключами (как в твоём шаблоне).

```

function run_single_experiment(params::Dict)
    @unpack n, s, fi, case, span, nphi, tspan_boat, nt_boat, solver = params

```

Параметры для ODE в виде именованного кортежа

```
p = (n=n, s=s, fi=fi)
```

Начальное условие r_0 зависит от кейса

```
r0 = case == :plus ? s/(n+1) : s/(n-1)
```

— Катер (ODE) —

```
θgrid = collect(LinRange(θspan[1], θspan[2], nθ))  
prob = ODEProblem(cutter_ode!, [r0], θspan, p)  
sol = solve(prob, solver; saveat=θgrid)  
  
r_cutter = first.(sol.u)
```

— Лодка (аналитика) —

```
tgrid = collect(LinRange(tspan_boat[1], tspan_boat[2], nt_boat))  
r_boat = VectorFloat64{undef, length(tgrid)}  
θ_boat = VectorFloat64{undef, length(tgrid)}  
for (i, tt) in pairs(tgrid)  
    ri, θi = boat_polar(tt, p)  
    r_boat[i] = ri  
    θ_boat[i] = θi  
end
```

— Мини-анализ (несколько метрик, чтобы было что сравнивать в сканировании) — 1) финальный радиус катера на $\theta=\text{end}$

```
r_cutter_final = r_cutter[end]
```

2) максимальный радиус лодки на её сетке

```
r_boat_max = maximum(r_boat)
```

3) простая «разница масштабов» (без строгого физического смысла, но для сравнения кейсов полезно)

```

scale_ratio = r_cutter_final / r_boat_max

return Dict(
    "solution" => sol,
    "□_points" => sol.t,
    "r_cutter" => r_cutter,

    "t_points_boat" => tgrid,
    "□_boat" => □_boat,
    "r_boat" => r_boat,

    "r0" => r0,
    "r_cutter_final" => r_cutter_final,
    "r_boat_max" => r_boat_max,
    "scale_ratio" => scale_ratio,

    "parameters" => params
)
end

```

5.5 Запуск базового эксперимента (кэширование)

```

data_base, path_base = produce_or_load(
    datadir(script_name, "single"),
    base_params,
    run_single_experiment;
    prefix = "polar",

```

```

    tag = false,
    verbose = true
)

println("\nРезультаты базового эксперимента:")
println(" r0: ", data_base["r0"])
println(" r_cutter_final: ", data_base["r_cutter_final"])
println(" r_boat_max: ", data_base["r_boat_max"])
println(" scale_ratio: ", round(data_base["scale_ratio"]; digits=4))
println(" Файл результатов: ", path_base)

```

5.6 Визуализация базового эксперимента

```

p1 = plot(
    data_base["□_points"], data_base["r_cutter"],
    proj=:polar,
    label="катер",
    xlabel="□",
    ylabel="r",
    title="Базовый эксперимент (case=$(base_params[:case]))",
    lw=2,
    legend=:topleft,
    grid=true
)
plot!(
    p1,
    data_base["□_boat"], data_base["r_boat"],

```

```

    proj=:polar,
    label="лодка",
    lw=2
)

savefig(p1, plotsdir(script_name, "single_experiment.png"))

```

5.7 Второй базовый эксперимент (как у тебя во 2-й части): case=:minus, tmax=15

```

base_params2 = copy(base_params)
base_params2[:case] = :minus
base_params2[:tspan_boat] = (1e-9, 15.0)
base_params2[:experiment_name] = "base_experiment_minus"

data_base2, path_base2 = produce_or_load(
    datadir(script_name, "single"),
    base_params2,
    run_single_experiment;
    prefix = "polar",
    tag = false,
    verbose = true
)

p1b = plot(
    data_base2["□_points"], data_base2["r_cutter"],
    proj=:polar,

```

```

    label="катер",
    xlabel="",
    ylabel="r",
    title="Базовый эксперимент (case=$(base_params2[:case]))",
    lw=2,
    legend=:topleft,
    grid=true
)
plot!(
    p1b,
    data_base2["_boat"], data_base2["r_boat"],
    proj=:polar,
    label="лодка",
    lw=2
)
savefig(p1b, plotsdir(script_name, "single_experiment_minus.png"))

```

5.8 Параметрическое сканирование

В твоей задаче естественно сканировать n (оно влияет и на ODE, и на r_0). При желании можно заменить на $:fi$ или $:s$ (или сделать сетку по двум параметрам).

```

param_grid = Dict(
    :n => [3, 4, 5, 6, 8, 10],      # сканируем n
    :s => [20],                    # фиксируем
    :fi => [3/4*pi],               # фиксируем

    :case => [:plus, :minus],      # сканируем оба кейса

```

```

:span => [(0.0, 2*pi)],
:n => [10_000],

:tspan_boat => [(1e-9, 8.0)],    # можно тоже сканировать, но обычно фиксируют
:nt_boat => [1_000],

:solver => [Tsit5()],
:experiment_name => ["parametric_scan"]
)

all_params = dict_list(param_grid)

println("\n" * "="^60)
println("ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ СКАНИРОВАНИЕ")
println("Всего комбинаций параметров: ", length(all_params))
println("Исследуемые n: ", param_grid[:n])
println("Исследуемые case: ", param_grid[:case])
println("="^60)

```

5.9 Запуск всех экспериментов и сбор результатов

```

all_results = []
all_dfs = []

for (i, params) in enumerate(all_params)
    println("Порядок: $i/$(length(all_params)) | n=$(params[:n]) | case=$(params[:case])")
    # ... (code for running experiments) ...
end

```

```

data, path = produce_or_load(
    datadir(script_name, "parametric_scan"),
    params,
    run_single_experiment;
    prefix = "scan",
    tag = false,
    verbose = false
)

```

Сводка по эксперименту

```

result_summary = merge(
    params,
    Dict(
        :r0 => data["r0"],
        :r_cutter_final => data["r_cutter_final"],
        :r_boat_max => data["r_boat_max"],
        :scale_ratio => data["scale_ratio"],
        :filepath => path
    )
)
push!(all_results, result_summary)

```

Полные данные (катер) — удобно для дальнейших графиков/анализа

```

df = DataFrame(
    □ = data["□_points"],
    r = data["r_cutter"],
    n = fill(params[:n], length(data["□_points"])),
    case = fill(string(params[:case]), length(data["□_points"]))
)

```

```

    )
    push!(all_dfs, df)
end

```

5.10 Анализ и визуализация результатов сканирования

```

results_df = DataFrame(all_results)
println("\nСводная таблица результатов (первые строки):")
println(first(results_df, 10))

```

Сравнительный график траекторий катера для всех комбинаций (по θ)

```

p2 = plot(size=(900, 520), dpi=150)
for params in all_params
    data, _ = produce_or_load(
        datadir(script_name, "parametric_scan"),
        params,
        run_single_experiment;
        prefix = "scan",
        tag = false,
        verbose = false
    )

    plot!(
        p2,
        data["□_points"], data["r_cutter"],
        label="n=$(params[:n]), case=$(params[:case])",

```

```

        lw=2,
        alpha=0.8
    )
end
plot!(
    p2,
    xlabel="□",
    ylabel="r(□)",
    title="Сканирование: траектории катера (ODE) при разных n и case",
    legend=:outerright,
    grid=true
)
savefig(p2, plotsdir(script_name, "parametric_scan_cutter_comparison.png"))

```

График метрики `scale_ratio` по `n` (раздельно для `case`) (`scale_ratio = r_cutter_final / r_boat_max`)

```

p3 = plot(size=(900, 520), dpi=150)
for cs in unique(results_df.case)
    sub = results_df[results_df.case .== cs, :]
    plot!(
        p3,
        sub.n, sub.scale_ratio,
        seriestype=:scatter,
        label="case=$cs"
    )
end
plot!(
    p3,

```

```

    xlabel="n",
    ylabel="scale_ratio",
    title="Зависимость scale_ratio от n (для разных case)",
    legend=:topleft,
    grid=true
)
savefig(p3, plotsdir(script_name, "scale_ratio_vs_n.png"))

```

5.11 Бенчмаркинг с разными параметрами

```

println("\n" * "="^60)
println("Бенчмаркинг для разных n (оба case)")
println("="^60)

benchmark_results = []

```

Возьмём сетку n из param_grid и оба case (как в сканировании)

```

for n_value in param_grid[:n], case_value in param_grid[:case]
    bench_params = Dict(
        :n => n_value,
        :s => base_params[:s],
        :fi => base_params[:fi],
        :case => case_value,
        :span => base_params[:span],
        :n[] => base_params[:n[]],
        :tspan_boat => base_params[:tspan_boat],
        :nt_boat => base_params[:nt_boat],
    )
end

```

```

        :solver => base_params[:solver]
    )

```

```

function benchmark_run()

```

Только катер (ODE) — это и есть «вычислительная часть»

```

    p = (n=bench_params[:n], s=bench_params[:s], fi=bench_params[:fi])
    r0 = bench_params[:case] == :plus ? bench_params[:s]/(bench_params[:n]+1) : b
    prob = ODEProblem(cutter_ode!, [r0], bench_params[:tspan], p)
    return solve(prob, bench_params[:solver]; saveat=LinRange(bench_params[:tspan]
end

```

```

println("\nБенчмарк для n = $n_value, case = $case_value:")
b = @benchmark $benchmark_run() samples=80 evals=1
tsec = median(b).time / 1e9
println(" Медианное время: ", round(tsec; digits=4), " сек")

```

```

    push!(benchmark_results, (n=n_value, case=string(case_value), time=tsec))
end

```

```

bench_df = DataFrame(benchmark_results)

```

График времени вычисления от n (раздельно по case)

```

p4 = plot(size=(900, 520), dpi=150)
for cs in unique(bench_df.case)
    sub = bench_df[bench_df.case .== cs, :]
    plot!(
        p4,

```

```

        sub.n, sub.time,
        seriestype=:scatter,
        label="case=$cs"
    )
end
plot!(
    p4,
    xlabel="n",
    ylabel="Время вычисления, сек",
    title="Зависимость времени решения ODE от n (для разных case)",
    legend=:topleft,
    grid=true
)
savefig(p4, plotsdir(script_name, "computation_time_vs_n.png"))

```

5.12 Сохранение всех результатов

```

@save datadir(script_name, "all_results.jld2") base_params base_params2 param_grid al
@save datadir(script_name, "all_plots.jld2") p1 p1b p2 p3 p4

println("\n" * "="^60)
println("ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЗАВЕРШЕНА")
println("="^60)
println("\nРезультаты сохранены в:")
println(" • data/$(script_name)/single/ - базовые эксперименты")
println(" • data/$(script_name)/parametric_scan/ - параметрическое сканирование")
println(" • data/$(script_name)/all_results.jld2 - сводные данные")

```

```
println(" • plots/${script_name}/ - все графики")
println(" • data/${script_name}/all_plots.jld2 - объекты графиков")
println("\nДля анализа результатов используйте:")
println(" using JLD2, DataFrames")
println(" @load \"data/${script_name}/all_results.jld2\"")
println(" println(results_df)")
```

5.13 Анализ результатов моделирования

Было проведено численное интегрирование уравнения

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{r}{\sqrt{n^2 - 1}},$$

а также выполнено сопоставление полученной траектории с движением лодки, заданным аналитически.

5.14 Базовые эксперименты

5.14.1 1. Случай (case = plus)

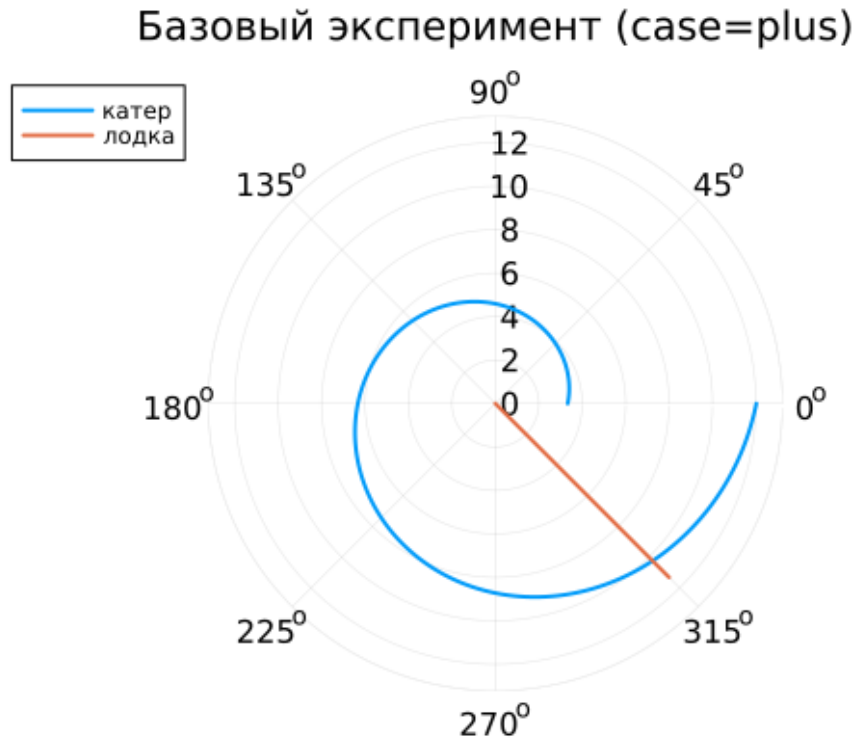


Рисунок 5.1: Базовый эксперимент (case=plus)

Траектория катера имеет вид логарифмической спирали. Радиус возрастает монотонно при увеличении угла θ . Поскольку правая часть уравнения пропорциональна r , зависимость носит экспоненциальный характер относительно угла.

Лодка движется по прямой, что в полярных координатах соответствует лучу.

Катер постепенно опережает лодку за счёт большей скорости и изменяющегося направления движения.

5.14.2 2. Случай (case = minus)



Рисунок 5.2: Базовый эксперимент (case=minus)

Во втором варианте начальный радиус больше, поэтому вся спираль смещена наружу.

Качественный характер траектории сохраняется, меняется лишь масштаб.

5.15 Параметрическое сканирование по n

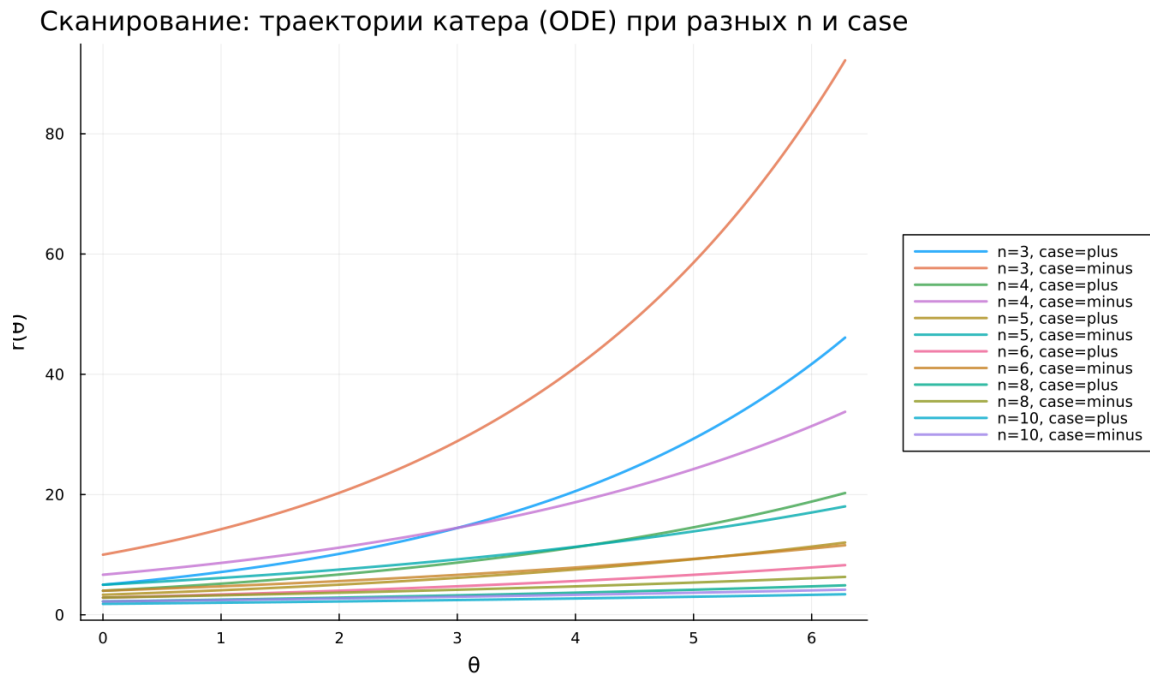


Рисунок 5.3: Сканирование траекторий катера

Из выражения

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{r}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

следует, что коэффициент роста равен $1/\sqrt{n^2 - 1}$.

При увеличении n :

- спираль раскручивается медленнее;
- радиальный рост замедляется;
- траектория становится более полой.

Для малых n наблюдается наиболее интенсивное увеличение радиуса.

5.16 Анализ метрики scale_ratio

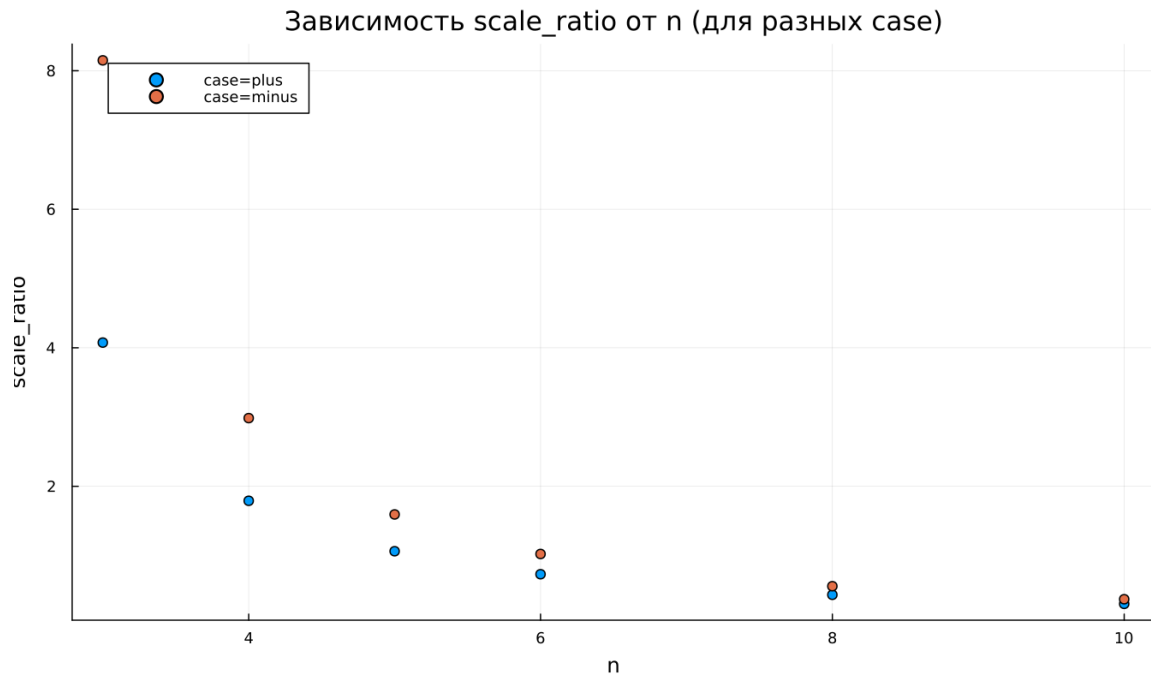


Рисунок 5.4: Зависимость scale_ratio от n

Введена характеристика

$$\text{scale_ratio} = \frac{r_{\text{final}}}{\max(r_{\text{boat}})}.$$

Она показывает относительное превосходство катера по радиусу.

При малых n значение значительно превышает 1.

С ростом n показатель уменьшается и стремится к единице.

Для случая case=minus значения выше из-за большего начального радиуса.

5.17 Время вычислений

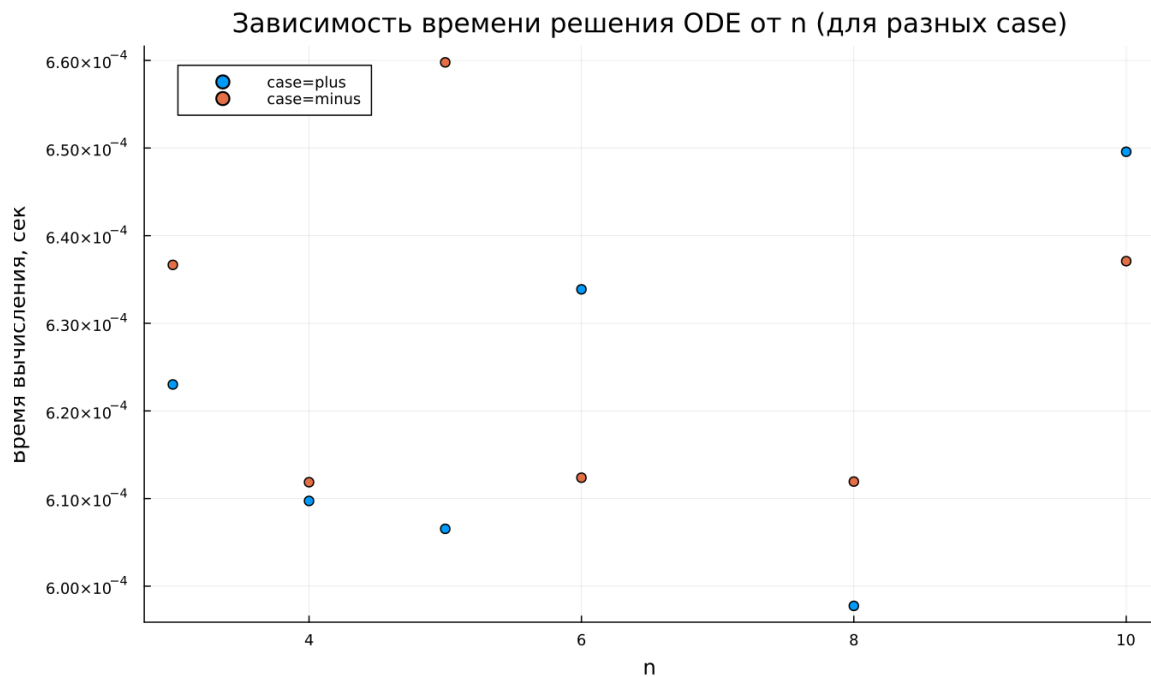


Рисунок 5.5: Зависимость времени вычисления от n

Измерение времени интегрирования показало:

- среднее значение порядка 6×10^{-4} секунды;
- существенной зависимости от n не выявлено;
- вариации связаны с особенностями численного метода.

6 Выводы

1. Траектория катера описывается логарифмической спиралью.
2. Параметр n определяет интенсивность радиального роста.
3. Начальные условия влияют на масштаб, но не на форму кривой.
4. Численное решение демонстрирует устойчивость и малые вычислительные затраты.

Результаты численного эксперимента согласуются с аналитическим решением.

Список литературы

1. Задача о погоне