

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.032.2

МЕТОДЫ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА В ОБРАБОТКЕ ТРАЕКТОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. А. Богданов, инженер-программист 2-й категории АО «РКЦ «Прогресс» – филиал ОКБ «Спектр», Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-3806-5320, e-mail: paladin_1988@mail.ru

С. В. Спицын, инженер-конструктор 1-й категории АО «РКЦ «Прогресс» – филиал ОКБ «Спектр», Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-6468-5043, e-mail: spitsyn62@gmail.com

С. А. Тихомиров, доцент кафедры САПР ВС РГРТУ, главный конструктор проекта АО «РКЦ «Прогресс» – филиал ОКБ «Спектр», Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-3174-1536, e-mail: serge-tikhomirov@yandex.ru

Рассматривается алгоритм расчета координат точек падения отделяющихся частей изделия при проведении полигонных испытаний ракетно-космической техники для формирования признаков попадания и промаха с применением методов регрессионного анализа. Целью работы является нахождение унифицированной методики расчета баллистической траектории отделяющихся частей изделия, отвечающей как требованиям послеполётной обработки информации и анализа данных, так и требованиям анализа и обработки данных непосредственно во время пуска в режиме реального масштаба времени. Для этих целей в предложенную методику расчёта предлагается ввести этапы прогнозирования значений расчетных величин на основе методов регрессионного анализа с подбором и построением оптимальной статистической модели. В качестве такой модели предлагается одномерная линейная регрессионная модель позволяющая установить взаимосвязь одной количественной зависимой переменной и нескольких независимых предикторов.

Ключевые слова: информационно-измерительное обеспечение ракетных пусков, системы сбора измерительной информации, бортовая навигационная аппаратура потребителя, телеметрическая информация, линейная регрессия.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-80-88

Введение

Одной из приоритетных задач при проведении ракетных пусков (полигонных испытаний изделия) являются обработка и анализ траекторных измерений. К этим задачам также относятся и установление фактических координат точек падения отделяющихся частей. Именно на их основании в том числе формируется признак попадания или промаха посредством сопоставления с зоной расчетных координат и учетом предельно допустимых отклонений.

Предлагается реализовать следующее:

а) установить общий унифицированный алгоритм расчета координат точек падения (географической широты и долготы) отделяющихся частей изделия для формирования признака попадания и промаха, а также координат точек падения объекта в случае нештатной (аварийной) ситуации для соответствующих временных отрезков;

б) определить исходные и результирующие данные;

в) предусмотреть конвертацию форматов данных с целью проведения дальнейшего анализа с применением программных средств;

г) определить степень соответствия предложенного алгоритма требованиям быстродействия обработки информации и производимых вычислений в режиме реального масштаба времени;

д) с целью повышения быстродействия, для расчетов, производимых в режиме реального масштаба времени, ввести этапы применения методов регрессионного анализа и построения подходящих регрессионных моделей.

Теоретические исследования

Методика расчета баллистической траектории отделяющихся частей и формирования признаков попадания и промаха

Входными данными для расчета баллистической траектории отделившихся частей и формирования признаков попадания и промаха являются:

– данные о скорректированной траектории, полученные из информации, поступившей в составе телеметрического потока с борта изделия;

– массогабаритные данные изделия;

– азимут прицеливания;

– предельно допустимые отклонения точек падения отделившихся частей.

Выходными данными является файл событий, содержащий следующую информацию:

– точки разделения частей объекта;

– точка падения головной части;

– баллистическая траектория отделившихся частей;

– признаки попадания/промаха;

– уточненная траектория объекта.

Расчет баллистической траектории будет осуществляться в стартовой системе координат. Параметры земной поверхности, ее форма и размеры берутся исходя из референц-эллипсоида им. Красовского. Для расчета баллистической траектории предлагается использовать следующий алгоритм [1]:

а) находим проекцию вектора угловой скорости вращения Земли на оси стартовой системы координат w_{3x} , w_{3y} , w_{3z} :

$$w_{3x} = w_3 \cos(\varphi) \cos(\psi),$$

$$w_{3y} = w_3 \sin(\varphi),$$

$$w_{3z} = -w_3 \cos(\varphi) \sin(\psi),$$

где φ – геоцентрическая широта точки старта, ψ – азимут прицеливания, $w_3 = 0.00007292115 \text{ с}^{-1}$ – угловая скорость вращения Земли;

б) находим постоянные коэффициенты a_{11} , a_{22} , a_{33} , a_{12} , a_{13} , a_{21} , a_{23} , a_{31} , a_{32} :

$$a_{11} = w_3^2 - w_{3x}^2,$$

$$a_{22} = w_3^2 - w_{3y}^2,$$

$$a_{33} = w_3^2 - w_{3z}^2,$$

$$a_{23} = a_{32} = -w_{3y}w_{3z},$$

$$a_{31} = a_{13} = -w_{3z}w_{3x},$$

$$a_{12} = a_{21} = -w_{3x}w_{3y},$$

$$b_{23} = 2w_{3x}, \quad b_{32} = -b_{23},$$

$$b_{31} = 2w_{3y}, \quad b_{13} = -b_{31},$$

$$b_{12} = 2w_{3z}, \quad b_{21} = -b_{12};$$

в) находим расстояние r от объекта с текущими координатами, взятыми из телеметрического кадра и переведенными в стартовую систему:

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

где x_c , y_c , z_c – координаты центра Земли относительно стартовой системы координат, а x , y , z – координаты объекта в геоцентрической системе координат;

г) находим скорость объекта в стартовой системе координат v в текущий момент времени:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2},$$

где v_x, v_y, v_z – скорости объекта, взятые из кадра телеметрии;

д) находим радиальную g_r и меридиональную g_w составляющие ускорения:

$$g_r = -\frac{\frac{-\mu}{r^2} - 1,5\mu J_2 R_e^2}{r^4(1-5\sin(\varphi)^2)}, \quad g_w = \frac{-3\mu J_2 R_e^2}{r^4 \sin(\varphi)},$$

где $\mu = 398600.44 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{с}^2$ – произведение постоянной тяготения на массу Земли, $J_2 = 1082.7 \cdot 10^{-6}$ – вторая зональная гармоника, $R_e = 6378160 \text{ м}$ – средний экваториальный радиус Земли;

е) находим численное решение системы соответствующих дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты четвертого порядка:

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{-C_x p v S_{v_x}}{2m} - \frac{g_r(x-x_c)}{r} - \frac{g_w w_{3_x}}{w_3} + a_{11}(x-x_c) + a_{12}(y-y_c) + a_{13}(z-z_c) + b_{12}v_y + b_{13}v_z,$$

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{-C_x p v S_{v_x}}{2m} - \frac{g_r(y-y_c)}{r} - \frac{g_w w_{3_y}}{w_3} + a_{21}(x-x_c) + a_{22}(y-y_c) + a_{23}(z-z_c) + b_{21}v_x + b_{23}v_z,$$

$$\frac{dv_z}{dt} = \frac{-C_x p v S_{v_x}}{2m} - \frac{g_r(z-z_c)}{r} - \frac{g_w w_{3_z}}{w_3} + a_{31}(x-x_c) + a_{32}(y-y_c) + a_{33}(z-z_c) + b_{31}v_x + b_{32}v_y,$$

$$\frac{dx}{dt} = v_x, \quad \frac{dy}{dt} = v_y, \quad \frac{dz}{dt} = v_z,$$

где C_x – безразмерный аэродинамический коэффициент для расчета пассивного участка траектории, p – плотность воздуха в данной точке траектории, S – площадь миделя для расчета пассивного участка траектории, m – масса отделившейся части.

Параметры C_x, S, m выбираются согласно массогабаритным данным объекта, параметр p – согласно ГОСТ 4401-81;

ж) расчет высоты над поверхностью Земли производится по формуле:

$$h = r - r_0,$$

где r_0 – радиус Земли в текущей точке полета;

з) после того как траектория относительно поверхности Земли ($h = 0$) рассчитана, определяются признаки попадания/промаха. Признак попадания/промаха определяется совпадением координат объекта с зоной расчетных координат точек падения отделившихся частей с учетом заданных предельно допустимых отклонений.

Экспериментальные исследования

Все вычисления будем производить на основе исходных данных, представляющих собой 5348 измерений широты, долготы и высоты головной части изделия (параметры «latitude», «altitude» и «longitude» соответственно), проведенных на отрезке времени от $t_0 = 51573,4$ до $t_n = 52241,7 \text{ с}$ (параметр «time»). Первые четыре измерения показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

Table 1 – Initial data

time	latitude	longitude	altitude	lat1	long1	t2	lat2	latA
51573.4	48.32.27	46.18.4	19.1591	nan	nan	nan	nan	nan
51573.5	48.32.27	46.18.4	19.1591	nan	nan	nan	nan	nan
51573.6	48.32.27	46.18.4	19.1591	nan	nan	nan	nan	nan
51573.7	48.32.27	46.18.4	19.1591	nan	nan	nan	nan	nan

В связи с тем, что географические координаты одной и той же точки могут быть представлены в разных форматах, а для реальных пусковых работ этот формат, как правило имеет

вид dd mm ss (т.е. градусы, минуты, секунды), для дальнейшей работы с данными с помощью программных средств в алгоритм предлагается ввести дополнительную конвертацию координат в формат dd.ddddd (десятичные градусы) по формуле пересчета $ddd = dd + \frac{mm}{60} + \frac{ss}{3600}$, а также предусмотреть и обратную конвертацию из формата dd.ddddd в dd mm ss для привычной простоты восприятия и наглядности:

$$\begin{aligned} dd &= \text{trunc}(ddd), \\ mm &= \text{trunc}((ddd - dd) * 60), \\ ss &= ((ddd - dd) * 60 - mm) * 60, \end{aligned}$$

где *trunc* – функция отбора, усекающая число до целого и отбрасывающая дробную часть, *ddd* – координаты в формате dd.ddddd, *dd* – градусы, *mm* (mm.mmmmm) – минуты, *ss* – секунды [2].

Проведя все необходимые траекторные расчёты согласно предложенному выше алгоритму, а также после конвертации географических координат в подходящий для дальнейшей обработки формат типа dd.ddddd (соответствует типу double), мы получили следующие результаты: в связи со значительным объемом данных итоговая таблица представлена в двух частях – расчеты на начальном этапе на отрезке времени от 51573.4 до 51573.7 сек приведены в таблице 2 и некоторые промежуточные расчеты, соответствующие временному отрезку от 51998.1 до 51998.4 с приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Результаты расчетов на начальном этапе
Table 2 – Calculation results at initial stage

time	latitude	longitude	altitude	lat1	long1	t2	lat2	latA
51573.4	48.5411	46.3011	19.1591	48.5411	46.3011	53573.4	48.5411	48.5411
51573.5	48.5411	46.3011	19.1591	48.5411	46.3011	53573.5	48.5411	48.5411
51573.6	48.5411	46.3011	19.1591	48.5411	46.3011	53573.6	48.5411	48.5411
51573.7	48.5411	46.3011	19.1591	48.5411	46.3011	53573.7	48.5411	48.5411

Таблица 3 – Результаты расчетов на промежуточном этапе
Table 3 – Calculation results at intermediate stage

time	latitude	longitude	altitude	lat1	long1	t2	lat2	latA
51998.1	48.5248	46.8541	97451.6	48.2421	53.3383	677998	48.24	48.2433
51998.2	48.5248	46.8554	97655.8	48.2413	53.3613	678998	48.2392	48.2425
51998.3	48.5248	46.8568	97860.1	48.2409	53.3844	679998	48.2388	48.2421
51998.4	48.5248	46.8582	98064.9	48.2402	53.4088	681998	48.2382	48.2415

Предложенный алгоритм вполне подходит для отложенной обработки и анализа, т.е. для послеполётного режима пуска, но вследствие того, что одно лишь численное решение системы дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты 4 порядка требует достаточно большого объема вычислений, производить траекторные расчёты в режиме реального масштаба времени (т.е. непосредственно во время полёта) согласно такому алгоритму целесообразно только для расчета координат точек падения первой ступени, а для формирования признаков попадания, промаха, а также расчета координат точек падения второй ступени и аварийного случая предлагается использовать прогнозирование посредством методов регрессионного анализа. Для этого: с помощью языка программирования Python и импортированной библиотеки для анализа и обработки данных «pandas» произведем предобработку «сырых» расчетных данных (raw data): создадим новый объект типа DataFrame размерностью 5348 строк × 13 столбцов, т.е. 5348 наблюдений тринадцати переменных, присвоим колонкам соответствующие названия, определяющие тип наблюдения (время, широта, долгота, высота) и его принадлежность к определенной части изделия (головной части, первой ступени, второй ступени) или к случаю нештатной ситуации. Заметим, что наблюдения «time», «latitude», «longitude», «altitude», относятся к головной части изделия и не являются расчетными, а поступают в готовом виде в составе телеметрического кадра БРТС (бортовой радиотелеметрической системы) [3]. Далее с помощью метода *drop()* отседем неинформативные наблюдения,

возникающие, как правило вследствие зашумленности телеметрии, в нашем случае это последние наблюдения в датафрейме с индексами 5346,5347и 5348, и сохраним полученный датафрейм в файл с расширением .csv для дальнейшего анализа:

```
import pandas as pd
colnames = ['time', 'latitude', 'longitude', 'altitude', 't1', 'lat1', 'long1', \
't2', 'lat2', 'long2', 'tA', 'latA', 'longA']
result = pd.read_csv('c:/points/result.csv', sep = ';', names = colnames, \
index_col = False).drop([5346,5347,5348])
result.to_csv('c:/points.csv', index = False)
```

После проведенной предобработки воспользуемся средствами языка программирования R, целевым назначением которого являются статистическая обработка и визуализация данных [4]: импортируем необходимые библиотеки, считаем данные из .csv файла и построим матрицу корреляции всех без исключения имеющихся в нём значений (рисунок 1):

```
library(PerformanceAnalytics)
df = read.csv("c:/points.csv")
chart.Correlation(df)
```

Вверху на пересечении строк и столбцов матрицы указаны коэффициенты корреляции соответствующих величин, внизу – точечные диаграммы рассеяния (scatter plot) на декартовой плоскости с выделенными линиями регрессии. Знак коэффициента корреляции соответственно указывает на положительную или отрицательную корреляцию между значениями. В случае ярко выраженной взаимосвязи переменных (наблюдений) их коэффициент корреляции равен $|1|$, а в отсутствие такой взаимосвязи коэффициент будет стремиться к 0, т.е. знак коэффициента корреляции отражает направление взаимосвязи.

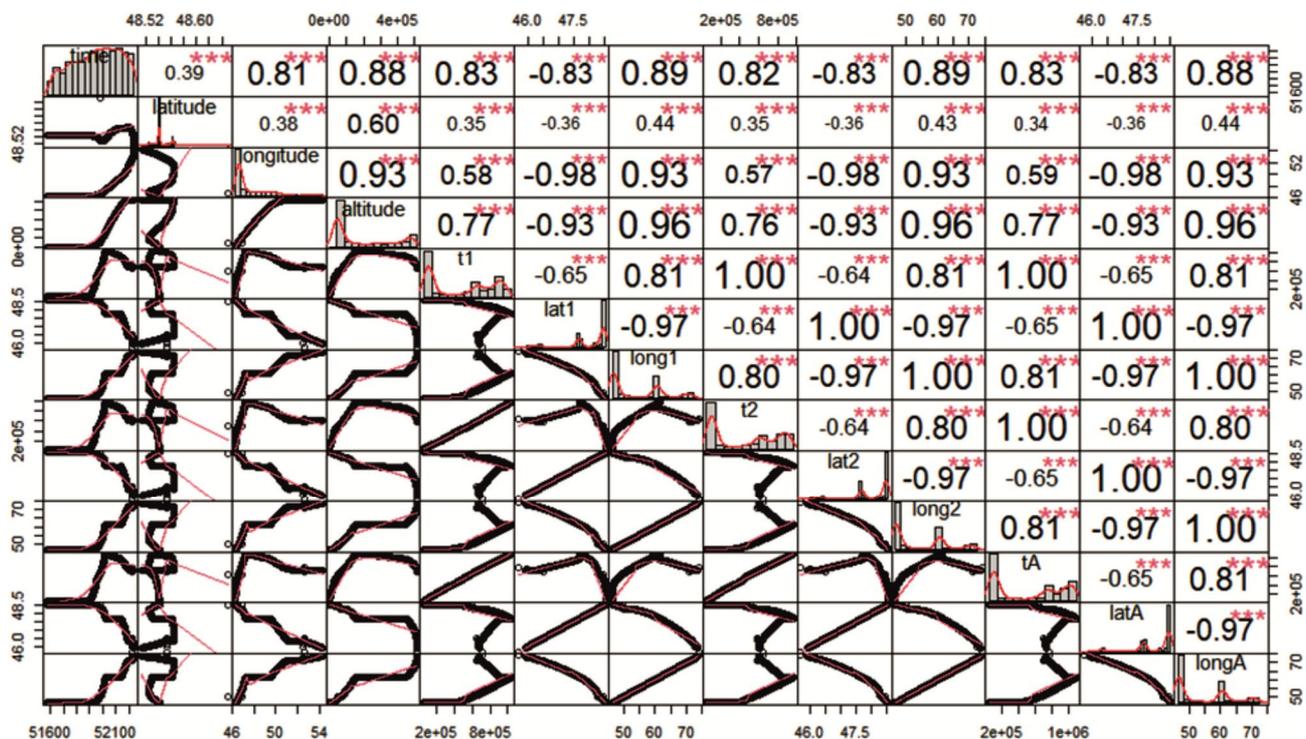


Рисунок 1 – Матрица корреляции
Figure 1 – Correlation matrix

Исходя из матрицы корреляции, можно сделать вывод, что взаимосвязь между переменными широт падения различных частей изделия, а также расчетной широтой падения в случае нештатной ситуации, т.е. переменными «lat1», «lat2» и «latA», носит выраженный линейный характер со значением коэффициента корреляции r_{XY} , равным 1.00, что делает возмож-

ным применение не только методов множественной линейной регрессии, но также и методов одномерного регрессионного анализа с одним предиктором, позволяющих исследовать взаимосвязь только двух переменных.

В случае явно выраженной линейной взаимосвязи между двумя количественными переменными в качестве метрики, определяющей силу и направление такой взаимосвязи, оптимальным будет использование линейного коэффициента корреляции Пирсона r_{XY} , рассчитанного по формуле (1) и принимающего значения, лежащие в интервале $[-1;1]$.

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{(N-1)\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{(N-1) \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N-1}} \sqrt{\frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{N-1}}} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{(N-1) \frac{1}{(N-1)} \sqrt{\sum (X - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y - \bar{Y})^2}} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y - \bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

где cov_{XY} – корреляционный момент (ковариация) величин X и Y , σ – среднее квадратическое отклонение; $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ – среднее значение первой выборки; $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ – среднее значение второй выборки.

В остальных случаях целесообразным будет использование непараметрических ранговых аналогов коэффициента корреляции Пирсона, учитывающих переход от реальных значений признака к ранжированным: коэффициента корреляции Спирмена $r_s = 1 - \frac{6 \sum_i d_i^2}{N(N^2 - 1)}$, где d_i – это разность полученных рангов значений X и Y , и коэффициента корреляции тау Кендалла $\tau = \frac{2S}{n(n-1)}$, где S – это разность суммарного числа наблюдений, следующих за текущими наблюдениями с большим значением рангов Y и суммарного числа наблюдений, следующих за текущими наблюдениями с меньшим значением рангов Y , без учета равных рангов.

Таким образом, расчетным путем, т.е. используя описанный выше алгоритм расчета баллистической траектории отделяющихся частей для формирования признаков попадания и промаха, предлагается вычислять только значение широты «lat1», а для вычисления значений широт падения «lat2» и «latA» предлагается использовать простую линейную регрессию, в которой значение «lat2» или «latA» будет выступать откликом, т.е. зависимой переменной. В качестве предиктора будет выступать расчетное значение «lat1». После этого перейдем к этапу построения линейной регрессионной модели, описывающей взаимосвязь этих двух переменных, т.е. предиктора и отклика. Для этого сформируем новый датафрейм, содержащий в себе время падения второй ступени «t2» и только два наблюдения соответствующих широт «lat1» и «lat2», путем исключения из исходного датафрейма «df» наблюдений с порядковыми номерами 1, 2, 3, 4, 5, 7, а также с 10 по 13. С помощью метода $lm()$ построим линейную регрессионную модель «fit», в которой переменная «lat2», характеризующая широту падения второй ступени изделия, является откликом, а полученная расчетным путем переменная «lat1», характеризующая широту падения первой ступени изделия, является предиктором. Для того чтобы провести сравнительный анализ расчетных и предсказанных регрессионной моделью значений широт для определенных моментов времени t_2 , расчетные значения переменной «lat2», а также значения атрибута полученной модели $\$fitted.values$, содержащего спрогнозированные значения отклика, запишем в таблицу данных «fitted_values» и сохраним полученные данные в .csv файл.

```
df = df[, -c(1:5, 7, 10:13)]
fit = lm(lat2 ~ lat1, df)
fitted_values = data.frame(t2 = df1$t2, lat2 = df1$lat2, fitted = fit$fitted.values)
write.csv(fitted_values, "D:/fitted_values.csv", row.names = FALSE)
```

Результатом будет являться матрица данных размерностью 5345 × 3 (без учёта индексов наблюдений), представленная в таблице 4 и позволяющая сделать вывод о том, что спрогнозированные значения широт падения второй ступени изделия (колонка «fitted»), отделившись от головной части, соответствуют расчетным значениям (колонка «lat2») с достаточно высоким уровнем точности.

Таблица 4 – Расчетные и предсказанные значения
Table 4 – Calculated and predicted values

Index	lat2	Fitted	t2
0	48.5411	48.540817	53573.4
1	48.5411	48.540817	53573.5
2	48.5411	48.540817	53573.6
3	48.5411	48.540817	53573.7
4	48.5411	48.540817	53573.8
...
5341	45.8942	45.895360	610242.0
5342	45.8921	45.893448	610242.1
5343	45.8909	45.892140	610242.2
5344	45.8899	45.891234	610242.3
5345	45.8890	45.889221	610242.4

В дополнение к этому можно визуализировать полученные результаты путем наложения графика временной зависимости расчетной широты на график временной зависимости спрогнозированной широты (рисунок 2).

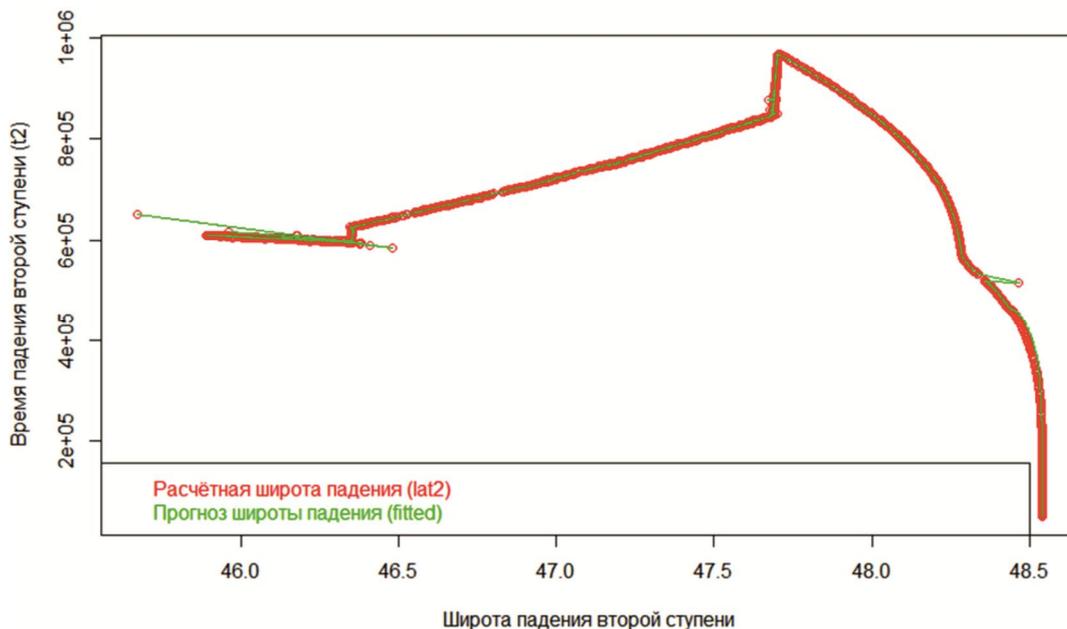


Рисунок 2 – Совместный график расчетных и спрогнозированных широт падения
Figure 2 – Joint plot of calculated and predicted latitudes of falling

```
plot(fitted_values$lat2, fitted_values$t2, type = "p", col = "red", xlab = 'Широта падения второй ступени', ylab = 'Время падения второй ступени (t2)')
lines(fitted_values$fitted, fitted_values$t2, col = "green")
legend("bottomleft", c("Расчётная широта падения (lat2)", "Прогноз широты падения (fitted)"), text.col = c("red", "green"))
```

Некоторые выбросы на совместном графике (красные точки), скорее всего, обусловлены недостоверностью телеметрической информации, поступившей с борта, на основании которой производился расчет, что также объясняет их присутствие и на графике спрогнозированных значений (зелёные линии, соединяющие красные точки с основным графиком значений).

Для решения вопроса повышения точности спрогнозированных значений посредством ввода в регрессионную модель дополнительных предикторов, т.е. расширения модели до формата множественной регрессии, нужно снова обратиться к матрице корреляции. Из неё следует, что помимо выраженной корреляции между «lat1» и «lat2» в матрице также имеет место достаточно высокая мультиколлинеарность, т.е. присутствует выраженная линейная взаимосвязь между самими предикторами, из чего можно сделать вывод, что введение в модель новых независимых переменных скорее всего повлияет на точность прогнозов негативным образом. Таким образом, применение простой линейной регрессии с одним предиктором в этом случае является оправданным.

Заключение

В рамках проделанной работы получены следующие результаты:

– предложена методика расчета баллистической траектории отделяющихся частей изделий ракетно-космической техники, в полной мере отвечающая требованиям послеполётной обработки и анализа траекторной информации при проведении полигонных испытаний и позволяющая с достаточно высоким уровнем достоверности формировать признаки попадания и промаха;

– с целью оптимизации предложенной методики под требования обработки траекторных измерений в режиме реального масштаба времени этапы расчёта величин, имеющих линейную взаимосвязь, заменены этапами прогнозирования с помощью методов регрессионного анализа и построения соответствующей регрессионной модели, описывающей взаимосвязь зависимой прогнозируемой переменной с различными предикторами;

– точность и достоверность данных, полученных в результате прогнозирования на определённых временных отрезках, подтверждены их табличным и графическим сопоставлением с соответствующими расчётными величинами.

Библиографический список

1. Спицын С. В., Товпеко А. В. Алгоритм расчета целеуказаний измерительными средствами // Радиотехника № 11 (18), 2019. С. 28-34. DOI: 10.18127/j00338486-201911(18)-04
2. Балашов С. Ю., Спицын С. В. Особенности обработки, анализа и представления траекторных измерений при проведении пусков изделий РКТ // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 69. С. 175-184. DOI:10.21667/1995-4565-2019-69-175-184.
3. Спицын С. В., Товпеко А. В., Тихомиров С. А. Алгоритм обработки траекторных измерений при проведении ракетных пусков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 70. С. 118-126. DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-118-126
4. Kabacoff R. I. R in action. (Data Analysis and Graphics with R), NY, Manning Publications, 2011, 472 p.

UDC 004.032.2

REGRESSION ANALYSIS METHODS IN TRAJECTORY INFORMATION PROCESSING FOR ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY PRODUCTS

A. A. Bogdanov, programmer engineer, JSC «SRC «Progress» – department of special design bureau «Spectrum», Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-3806-5320, e-mail: paladin_1988@mail.ru

S. V. Spitsyn, post-graduate student, RSREU, design engineer, JSC «SRC «Progress» – department of special design bureau «Spectrum», Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-6468-5043, e-mail: spitsyn62@gmail.com

S. A. Tikhomirov, assistant professor of RSREU, senior specialist, JSC «SRC «Progress» – department of special design bureau «Spectrum», Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-3174-1536, e-mail: serge-tikhomirov@yandex.ru

*The paper considers the algorithm for coordinate calculation of rocket separating parts drop points during field tests (launches) of rockets and space technology products in order to form «hit or miss» signs. The proposed algorithm has stages of implementation of regression analysis methods. **The aim is to find a unified method for ballistic trajectory calculating for detachable parts of the rocket that meets both the requirements of post-flight information processing and data analysis, and the requirements of analysis and data processing directly during launch in real time. For these purposes, it is proposed to introduce the stages of forecasting (prediction stages) of calculated values into the proposed calculation methodology based on regression analysis methods with selection and construction of an optimal statistical model. As such, a one-dimensional linear regression model is proposed. It allows establishing the relationship of one quantitative dependent variable with several independent predictors.***

Key words: information and measurement support of launches, systems of measurement information gathering, onboard navigation consumer equipment, telemetry information, linear regression.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-80-88

References

1. **Spitsyn S. V., Tovpeko A. V.** Algoritm rascheta celeukazaniy izmeritel'nym sredstvom. *Radiotekhnika*. 2019, no. 83, № 11(18), pp. 28-34 (in Russian). DOI: 10.18127/j00338486-201911(18)-04
2. **Balashov S. V., Spitsyn S. V.** Osobennosti obrabotki, analiza i predstavleniya traektornyh izmerenij pri provedenii puskov izdelij RKT. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2019, no. 69, pp. 175-184 (in Russian). DOI:10.21667/1995-4565-2019-69-175-184
3. **Spitsyn S. V., Tovpeko A. V., Tikhomirov S. A.** Algoritm obrabotki traektornyh izmerenij pri provedenii raketnyh puskov. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2019, no. 70, pp. 118-126 (in Russian). DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-118-126
4. **Kabacoff R. I.** *R in action*. (Data Analysis and Graphics with R), NY, Manning Publications, 2011, 472 p.