

# ОБУЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ПЕРЕМЕННЫХ, СОДЕРЖАЩИХ КОМПЛЕКСНЫЕ ЧИСЛА, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ SCIKIT-LEARN

## Актуальность задачи

Комплексные числа широко используются для вычислений в науке, технике, экономических показателях. Примером их использования являются задачи электротехники, радиофизики, схемотехники, обработки сигналов, теории управления, эконометрики и т. д.

Алгоритмы scikit-learn не поддерживают работу с комплексными числами, что не позволяет построить модели регрессии для данных, содержащих комплексные числа.

Попытки обойти это препятствие, как правило, сводятся к разделению исходного датасета с комплексными числами на два вещественных датасета, содержащих, соответственно, реальную и мнимую части исходного датасета с последующим построением независимых моделей регрессии для каждого выделенного датасета. Окончательная модель для прогноза целевой переменной, являющейся комплексным числом, представляет собой объединение прогнозов обеих моделей регрессии для реальной и мнимой частей в одно комплексное число.

Такой подход к решению этой задачи не имеет математического обоснования, так как в общем случае значение реальной части целевой переменной зависит от мнимой части исходного датасета и, наоборот, значение мнимой части целевой переменной зависит от реальной части исходного датасета. Очевидно, что при описанном подходе такие зависимости игнорируются.

Таким образом возникает актуальная задача обоснованного преобразования исходного датасета с комплексными числами в датасет с вещественными числами, учитывающего взаимные зависимости реальных и мнимых частей целевой переменной и исходного датасета, что позволит для построения достоверной модели регрессии комплексных чисел воспользоваться стандартными моделями регрессоров scikit-learn.

## Решение задачи

В общем случае операторное уравнение для определения неизвестных параметров регрессии имеет следующий вид (подчеркивание означает, что величина относится к множеству  $\mathbb{C}$  комплексных чисел)

$$\underline{A} \underline{z} = \underline{b}, \quad (1)$$

где  $\underline{A}$  – заданный оператор значений признаков;

$\underline{z}$  – неизвестная функция параметров регрессии;

$\underline{b}$  – заданная функция значений целевой переменной.

В нашем случае значения признаков и целевой переменной заданы в виде датасета размером  $M \times N$  и, следовательно, оператор  $\underline{A}$  является матрицей заданных значений признаков, а функция  $\underline{b}$  – вектором заданных значений целевой переменной. При этом матрица  $\underline{A}$  имеет размер  $M \times (N - 1)$ , а вектор  $\underline{b}$  имеет размер  $M \times 1$ .

Представим операторное уравнение (1) в следующем виде

$$(A_x + jA_y)(z_x + jz_y) = b_x + jb_y, \quad (2)$$

где индексами  $x$  и  $y$  обозначены реальные и мнимые части комплексных величин, соответственно.

Предположим, что оператор  $\underline{A} = A_x + jA_y$  является линейным. Тогда уравнение (2) можно записать в следующем виде

$$A_x z_x - A_y z_y + j(A_y z_x + A_x z_y) = b_x + jb_y. \quad (3)$$

Далее разделяя действительную и мнимую части (3), получаем систему из двух вещественных операторных уравнений

$$\begin{cases} A_x z_x - A_y z_y = b_x \\ A_y z_x + A_x z_y = b_y \end{cases}, \quad (4)$$

которую можно представить в компактной форме

$$Az = b, \quad (5)$$

где  $A$  – расширенная вещественная матрица размером  $2M \times 2(N - 1)$ , элементами которой являются матрицы  $A_x$  и  $A_y$  заданных значений признаков

$$A = \begin{pmatrix} A_x & -A_y \\ A_y & A_x \end{pmatrix}; \quad (6)$$

$z$  – расширенный вещественный вектор размером  $2(N - 1) \times 1$ , элементами которого являются векторы  $z_x$  и  $z_y$  неизвестных параметров регрессии

$$z = \begin{pmatrix} z_x \\ z_y \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$b$  – расширенный вещественный вектор размером  $2M \times 1$ , элементами которого являются векторы  $b_x$  и  $b_y$  заданных значений целевой переменной

$$b = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Таким образом модель регрессии комплексных чисел, описываемая операторным уравнением (1), сводится к модели регрессии вещественных чисел, описываемой уравнением (5). Для обучения модели регрессии (5) необходимо вместо исходного датасета размером  $M \times N$  с комплексными числами использовать преобразованный датасет размером  $2M \times (2N - 1)$  с вещественными числами, полученный путем объединения матрицы  $A$  – определяемой выражением (6) и вектора  $b$  – определяемым выражением (8).

Прогноз  $b_{pred}$  целевой переменной для некоторого заданного вектора размером  $(N - 1) \times 1$  комплексных значений признаков  $\underline{a}_{pred} = a_{pred_x} + ja_{pred_y}$  описывается операторным выражением

$$b_{pred} = A_{pred}^T z, \quad (9)$$

где  $A_{pred}$  – матрица размером  $2(N - 1) \times 2$

$$A_{pred} = \begin{pmatrix} a_{pred_x} & a_{pred_y} \\ -a_{pred_y} & a_{pred_x} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Для получения прогноза  $b_{pred}$  целевой переменной необходимо в обученную модель передать матрицу  $A_{pred}^T$ . Результат  $b_{pred}$  прогноза целевой переменной будет представлен в виде вектора размером  $2 \times 1$ , в котором первый его элемент является реальной частью комплексного числа  $\underline{b}_{pred}$ , а второй элемент – мнимой частью  $\underline{b}_{pred}$ .

## Выводы

1. Алгоритмы scikit-learn не поддерживают работу с комплексными числами, что не позволяет построить модели регрессии для данных, содержащих комплексные числа.

2. Разработан метод, позволяющий преобразовать исходный датасет размером  $M \times N$  с комплексными числами в датасет размером  $2M \times (2N - 1)$  с вещественными числами, что позволяет использовать для построения модели регрессии комплексных чисел стандартные модели регрессоров scikit-learn.