

## Разбор летучки

---

# Лекция 5

## Байесовские методы классификации

---

Екатерина Тузова



## Мотивирующий пример

---

# Классификация сообщений

Датасет 20 newsgroups содержит почти 20000 сообщений из списков рассылки Usenet.

# Классификация сообщений

Датасет **20 newsgroups** содержит почти 20000 сообщений из списков рассылки Usenet.

Примеры сообщений из списка рассылки sci.crypt:

*When you find out a floppy password protect program,  
could you e-mail me.*

*Thanks*

*Not to mention Computer Associates. I'll have to be careful  
to stop telling people I'm a Clipper programmer, they might  
lynch me... :-)*

# Классификация сообщений

Датасет **20 newsgroups** содержит почти 20000 сообщений из списков рассылки Usenet.

Примеры сообщений из списка рассылки sci.crypt:

*When you find out a floppy password protect program,  
could you e-mail me.*

*Thanks*

*Not to mention Computer Associates. I'll have to be careful  
to stop telling people I'm a Clipper programmer, they might  
lynch me... :-)*

**Задача:** Построить классификатор, предсказывающий по тексту сообщения список рассылки, в который оно было отправлено.

# Вероятностная постановка задачи

$X$  – множество объектов

$Y$  – множество меток классов

$X \times Y$  – вероятностное пространство с плотностью  $p(x, y)$



# Вероятностная постановка задачи

$X$  – множество объектов

$Y$  – множество меток классов

$X \times Y$  – вероятностное пространство с плотностью  $p(x, y)$

$$p(x, y) = P_y p(x|y)$$

$P_y$  – априорная вероятность класса  $y$

$p(x|y)$  – функция правдоподобия класса  $y$

# Вероятностная постановка задачи

$X$  – множество объектов

$Y$  – множество меток классов

$X \times Y$  – вероятностное пространство с плотностью  $p(x, y)$

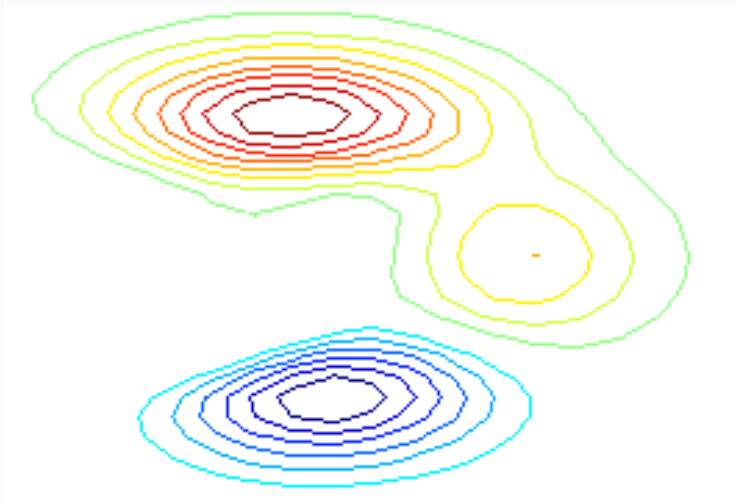
$$p(x, y) = P_y p(x|y)$$

$P_y$  – априорная вероятность класса  $y$

$p(x|y)$  – функция правдоподобия класса  $y$

**Задача:** Построить алгоритм  $a : X \rightarrow Y$ , минимизирующий **вероятность** ошибки.

# Плотности $p(x|y)$



Как правило, априорные вероятности  $P_y$  и функции правдоподобия классов  $p(x|y)$  неизвестны.

Как правило, априорные вероятности  $P_y$  и функции правдоподобия классов  $p(x|y)$  неизвестны.

2 подзадачи:

1. По выборке  $X^l$  из неизвестного распределения с плотностью  $p(x, y)$  построить оценки вероятностей  $\hat{P}_y$  и функций правдоподобия  $\hat{p}(x|y)$  для каждого класса
2. По известным  $P_y$  и  $p(x|y)$  построить функцию  $a(x)$ , минимизирующую вероятность ошибочной классификации

Предположим, что нам известно заранее распределение с плотностью  $p(x, y)$ . Как оценить вероятность ошибочной классификации для произвольного алгоритма  $a : X \rightarrow Y$ ?

$a : X \rightarrow Y$  разбивает  $X$  на непересекающиеся области:

$$A_s = \{x \in X | a(x) = s\} \quad s \in Y$$

$a : X \rightarrow Y$  разбивает  $X$  на непересекающиеся области:

$$A_s = \{x \in X | a(x) = s\} \quad s \in Y$$

**Ошибка:** объект  $x$  класса  $y$  попадает в  $A_s$ ,  $s \neq y$

Вероятность ошибки:  $p(A_s, y) = \int_{A_s} p(x, y) dx$



Идея: Введем  $\lambda_y$  – штраф за назначение неправильного класса объекту из  $y$

**Идея:** Введем  $\lambda_y$  – штраф за назначение неправильного класса объекту из  $y$

Функционал среднего риска алгоритма  $a$ :

$$R(a) = \sum_{s \in Y} \sum_{y \in Y} \lambda_y P_y p(A_s | y)$$

Минимум среднего риска  $R(a)$  достигается при:

$$a(x) = \arg \max_{y \in Y} \lambda_y P_y p(x|y)$$

# Принцип максимума апостериорной вероятности

Апостериорная вероятность класса  $y$  для объекта  $x$ :

$$P(y|x) = \frac{p(x, y)}{p(x)} = \frac{P_y p(x|y)}{\sum_{s \in Y} P_s p(x|s)} \propto P_y p(x|y)$$

# Принцип максимума апостериорной вероятности

Апостериорная вероятность класса  $y$  для объекта  $x$ :

$$P(y|x) = \frac{p(x, y)}{p(x)} = \frac{P_y p(x|y)}{\sum_{s \in Y} P_s p(x|s)} \propto P_y p(x|y)$$

Перепишем оптимальный алгоритм с использованием апостериорных вероятностей:

$$a(x) = \arg \max_{y \in Y} \lambda_y P(y|x)$$

Если  $\lambda_y = 1$ , то алгоритм максимизирует апостериорную вероятность для объекта  $x$ .

Чего еще не хватает для **работающего** классификатора?

1. Что представляют из себя  $X$  и  $Y$  для сообщений из списков рассылки

# На полпути к классификатору

1. Что представляют из себя  $X$  и  $Y$  для сообщений из списков рассылки
2. Выбрать функции правдоподобия  $p(x|y)$



# На полпути к классификатору

1. Что представляют из себя  $X$  и  $Y$  для сообщений из списков рассылки
2. Выбрать функции правдоподобия  $p(x|y)$
3. Научиться оценивать априорные вероятности классов  $\hat{P}_y$  и функции правдоподобия  $\hat{p}(x|y)$  из данных

$V = v_1, \dots, v_{|V|}$  – упорядоченное множество слов

Сообщение можно представить в виде вектора, в котором на  $j$ -ой позиции стоит 1, если  $v_d$  встречается в сообщении, и 0 в противном случае

$X \equiv \{0, 1\}^{|V|}$ , а  $Y$  это множество идентификаторов рассылки

$V = \text{who, I, let, dogs, out, the}$

$V = \text{who, I, let, dogs, out, the}$

Сообщение «Who let the dogs out? Who, who, who, who?» будет векторизовано как  $[1, 0, 1, 1, 1, 1]$ .

$V = \text{who, I, let, dogs, out, the}$

Сообщение «Who let the dogs out? Who, who, who, who?» будет векторизовано как  $[1, 0, 1, 1, 1, 1]$ .

Как будет векторизовано предложение «Well, if I am a dog, the party is on [...]»?

Как определить функцию правдоподобия для сообщения, представленного в виде бинарного вектора?

# Наивность

---

**Идея:** будем использовать дискретное распределение на множестве  $X$ , то есть сопоставим вероятность  $\theta_{yx}$  каждому значению  $x \in X$ , тогда

$$p(x|y) = \theta_{yx}$$



**Идея:** Предположим, что все признаки (компоненты вектора  $x$ ) независимы **при условии**  $y$ , тогда:

$$p(x|y) = \prod_{d=1}^{|V|} p(x^d|y)$$

# Функция правдоподобия

**Идея:** Предположим, что все признаки (компоненты вектора  $x$ ) независимы **при условии**  $y$ , тогда:

$$p(x|y) = \prod_{d=1}^{|V|} p(x^d|y)$$

Полученный классификатор называют **наивным** Байесовским классификатором из-за наивности сделанного предположения

$$a(x) = \arg \max_{y \in Y} \lambda_y P_y \prod_{d=1}^{|V|} p(x^d|y)$$

# Распределение Бернулли

Распределение Бернулли – дискретное распределение на множестве  $0, 1$  с параметром  $\theta \in [0, 1]$  — вероятностью **успеха** и функцией вероятности:

$$Ber(x; \theta) = \theta^x (1 - \theta)^{1-x}$$

# Распределение Бернулли

Распределение Бернулли – дискретное распределение на множестве  $0, 1$  с параметром  $\theta \in [0, 1]$  — вероятностью **успеха** и функцией вероятности:

$$Ber(x; \theta) = \theta^x (1 - \theta)^{1-x}$$

$$p(x|y) = \prod_{d=1}^{|V|} \theta_{yd}^x (1 - \theta_{yd})^{1-x}$$

Попробуем оценить параметры функций правдоподобия по выборке  $X^l$ .

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^l \ln p(x_i; \theta) \rightarrow \max_{\theta}$$

Как записать условие оптимума?

$$\frac{\partial}{\partial \theta} L(\theta) = \sum_{i=1}^l \frac{\partial}{\partial \theta} \ln p(x_i, \theta) = \sum_{i=1}^l \frac{x_i}{\theta} + \frac{1 - x_i}{\theta - 1} = 0$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial \theta} L(\theta) &= \sum_{i=1}^l \frac{\partial}{\partial \theta} \ln p(x_i, \theta) = \sum_{i=1}^l \frac{x_i}{\theta} + \frac{1 - x_i}{\theta - 1} = 0 \\ \Rightarrow \hat{\theta}_{ML} &= \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l x_i\end{aligned}$$

# Наивный Байесовски классификатор

Оценим методом максимального правдоподобия априорные вероятности классов  $\hat{P}_y$  и параметры распределения Бернулли  $\hat{\theta}_{yd}$

$$\hat{P}_y = \frac{\sum_{i=1}^l [y_i = y]}{l} \quad \hat{\theta}_{yd} = \frac{\sum_{i=1}^l [y_i = y] x_i^d}{\sum_{i=1}^l [y_i = y]}$$



# Наивный Байесовски классификатор

Оценим методом максимального правдоподобия априорные вероятности классов  $\hat{P}_y$  и параметры распределения Бернулли  $\hat{\theta}_{yd}$

$$\hat{P}_y = \frac{\sum_{i=1}^l [y_i = y]}{l} \quad \hat{\theta}_{yd} = \frac{\sum_{i=1}^l [y_i = y] x_i^d}{\sum_{i=1}^l [y_i = y]}$$

$$a(x) = \arg \max_{y \in Y} \lambda_y \hat{P}_y \prod_{d=1}^{|V|} \text{Ber}(x_i^d; \hat{\theta}_{yd})$$

## Пример

| $y \in Y$     | $\hat{P}_y$ | password | program | PGP |
|---------------|-------------|----------|---------|-----|
| sci.crypt     | 0.4         | 0.8      | 0       | 1   |
| comp.graphics | 0.6         | 0.2      | 0.6     | 0   |

## Пример

| $y \in Y$     | $\hat{P}_y$ | password | program | PGP |
|---------------|-------------|----------|---------|-----|
| sci.crypt     | 0.4         | 0.8      | 0       | 1   |
| comp.graphics | 0.6         | 0.2      | 0.6     | 0   |

Какой класс будет назначен сообщению  
«How should I add PGP support to my program?»,  
если  $\forall y \in Y (\lambda_y = 1)$ ?

| $y \in Y$     | $\hat{P}_y$ | password | program | PGP |
|---------------|-------------|----------|---------|-----|
| sci.crypt     | 0.4         | 0.8      | 0       | 1   |
| comp.graphics | 0.6         | 0.2      | 0.6     | 0   |

Какой класс будет назначен сообщению  
«How should I add PGP support to my program?»,  
если  $\forall y \in Y (\lambda_y = 1)$ ?

$$\begin{aligned} a(x) &= \arg \max_{y \in Y} \hat{P}(y|x = [0, 1, 1]) \\ &= \arg \max_{y \in Y} \{\hat{p}(\text{sci.crypt}|x), \hat{p}(\text{comp.graphics}|x)\} \\ &= \arg \max_{y \in Y} \{0, 0\} \end{aligned}$$

**Идея:** Введем параметр  $\alpha \geq 0$  и добавим его в ОМП для распределения Бернулли.

$$\hat{\theta}_{yd}^* = \frac{\sum_{i=1}^l [y_i = y] x_i^d + \alpha}{\sum_{i=1}^l [y_i = y] + 2\alpha}$$

Если в обучающей выборке много представителей класса  $y$ , содержащих слово  $v_d$ , то  $\hat{\theta}_{yd}^*$  будет стремиться к ОМП, в обратном случае  $\hat{\theta}_{yd}^* \approx \frac{1}{2}$

+ Просто реализовать и использовать

- + Просто реализовать и использовать
- + Можно обучать по потоку данных

Вопросы?



# Фреквентистский и Байесовский подходы

Фреквентистский подход предполагает, что параметры распределения некоторой случайной величины – это фиксированные (но, возможно, неизвестные) значения.

# Фреквентистский и Байесовский подходы

Фреквентистский подход предполагает, что параметры распределения некоторой случайной величины – это фиксированные (но, возможно, неизвестные) значения.

Байесовский подход считает все величины случайными, то есть у параметров тоже есть распределение:

$$p(x|\theta) = \text{Ber}(x|\theta) \quad p(\theta) = \text{Beta}(\theta|\alpha, \beta)$$

Таким образом, при Байесовском подходе нас интересует не точечная оценка параметра  $\hat{\theta}$ , а его апостериорное распределение:

# Фреквентистский и Байесовский подходы

Фреквентистский подход предполагает, что параметры распределения некоторой случайной величины – это фиксированные (но, возможно, неизвестные) значения.

Байесовский подход считает все величины случайными, то есть у параметров тоже есть распределение:

$$p(x|\theta) = \text{Ber}(x|\theta) \quad p(\theta) = \text{Beta}(\theta|\alpha, \beta)$$

Таким образом, при Байесовском подходе нас интересует не точечная оценка параметра  $\hat{\theta}$ , а его апостериорное распределение:

$$p(\theta|x) = \frac{p(\theta)p(x|\theta)}{\int p(\theta)p(x|\theta)d\theta} \propto p(\theta)p(x|\theta)$$

# Сопряжённое априорное распределение

**Наблюдение:** Часто можно выбрать априорное распределение  $p(\theta)$  таким образом, чтобы апостериорное распределение  $p(\theta|x)$  имело тот же вид, что и априорное, только с другими параметрами.

# Сопряжённое априорное распределение

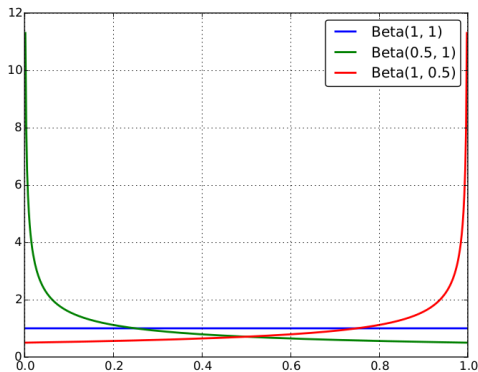
**Наблюдение:** Часто можно выбрать априорное распределение  $p(\theta)$  таким образом, чтобы апостериорное распределение  $p(\theta|x)$  имело тот же вид, что и априорное, только с другими параметрами.

Семейство распределений  $p(\theta|\alpha)$  называется априорным сопряжённым для семейства функций правдоподобия  $p(x|\theta)$ , если апостериорное распределение  $p(\theta|x, \alpha)$  остаётся в том же семействе:

$$p(\theta|x, \alpha) \propto p(\theta)p(x|\theta) = p(\theta|\alpha^*)$$

$\alpha$  и  $\alpha^*$  – это гиперпараметры, то есть параметры распределения параметров.

# Бета-распределение



$$p(\theta|\alpha, \beta) = \frac{\theta^{\alpha-1}(1-\theta)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)} \quad B(\alpha, \beta) = \int_0^1 \theta^{\alpha-1}(1-\theta)^{\beta-1} d\theta$$

## И снова про аддитивное сглаживание

Бета-распределение является априорным сопряжённым для распределения Бернулли

$$\begin{aligned} p(\theta|x, \alpha, \beta) &\propto p(\theta|\alpha, \beta)p(x|\theta) \\ &\propto (\theta^{\alpha-1}(1-\theta)^{\beta-1})(\theta^x(1-\theta)^{1-x}) \\ &\propto \theta^{(\alpha+x)-1}(1-\theta)^{\beta+1-x} - 1 = \text{Beta}(\theta|\alpha^*, \beta^*) \end{aligned}$$

## Оценка параметра $\theta$

$$\begin{aligned}\hat{\theta} &= \int_0^1 \theta p(\theta|x, \alpha, \beta) d\theta = \mathbb{E}[Beta(\theta|\alpha^*, \beta^*)] \\ &= \frac{\alpha^*}{\alpha^* + \beta^*} = \frac{\alpha + x}{\alpha + \beta + 1}\end{aligned}$$

Если  $\alpha = \beta$ , то  $\hat{\theta}$  в точности совпадает со сглаженной оценкой  $\hat{\theta}^*$



## Что почитать по этой лекции

- Kevin P. Murphy "Machine Learning: A Probabilistic Perspective" Chapter 3
- Воронцов "Байесовские алгоритмы классификации"
- Tom Mitchell "Machine Learning" Chapter 6

## На следующей лекции

- Перцептрон
- Функция потерь
- Преоброцессинг
- Ошибка обобщения