Учебник по Эконометрике

Лекция 3: Основы теории вероятностей

Джон Стачурски

Лекции: Акшай Шенкер

Перевел: Алексей Кедо

30 сентября 2020 г.

Вероятность фундаментальна для статистики и эконометрики, но технически сложна:

- множество событий, которым мы хотим присвоить вероятности, может быть очень большим
- нам нужны способы справиться со сложностью

Прежде чем мы начнем:

- множество S исчеслимо, если оно конечно или может быть представлено как последовательность
- в противном случае, множество S неисчеслимо

Пространство элементарных событий

Пространство элементарных событий можно представить себе как "список" всех возможных результатов в данном случайном эксперименте:

- пространство элементарных событий обычно обозначается как Ω
- пространством элементарных событий может быть только непустое множество
- типичный элемент Ω обозначается как ω

Реализация неопределенности приведет к выбору конкретной $\omega \in \Omega$

Пример. В случайном эксперименте, заключающемся в бросании кости один раз, множество возможных результатов представлено как $\Omega := \{1, \dots, 6\}$

Пример. Обезьяна Бертона Малкиела с завязанными глазами метает дротики в мишень радиусом 1

Введем обычные декартовы координаты с началом в центре мишени

Пусть (h, v) — типичные координаты, измеренные по горизонтали и вертикали соответственно

Естественное пространство элементарных событий — это $\Omega := \{(h, v) \in \mathbb{R}^2 : \|(h, v)\| \leq 1\}$ – также называется **единичным кругом** в $\mathbb{R}^2$

Неформально, **событие** — это подмножество Ω (мы скоро рассмотрим некоторые предостережения)

Событие A происходит всякий раз, когда отдельный $\omega \in \Omega$, выбранный в случайном эксперименте, оказывается в A

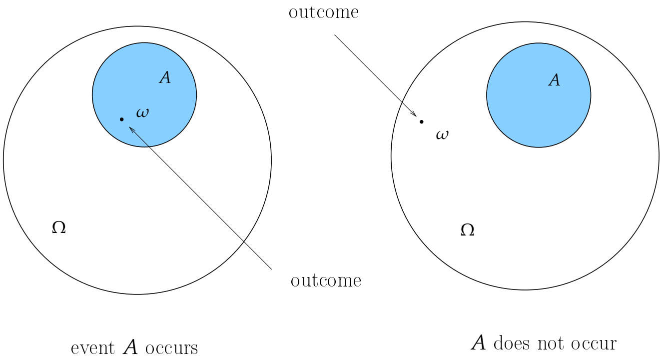

Рис.: Результаты и события

Вероятности и события

Можем ли мы присвоить вероятности каждому $\omega \in \Omega$?

Рассмотрим модель метания дротика, где Ω is $\mathbb{R}$:

- для $A \subset \Omega$, вероятность того, что дротик попадет в A пропорционален площади A
- вероятность точки $\omega \in \Omega$ будет меньше любой области A, содержащей ω
- для любых $\epsilon > 0$, мы можем найти A, содержащее ω, с площадью меньше ϵ

вероятность попадания в ω меньше ϵ для любых $\epsilon > 0$, значит вероятность попадания в ω должна быть равна нулю!

Итог: когда пространство элементарных событий исчеслимо, присваивать вероятности событиям (подмножествам Ω), не каждому $\omega \in \Omega$

Но можем ли мы присваивать вероятности *каждому* попространству Ω?

В модели дротика:

$$\mathbb{P}(A) = \frac{\lambda(A)}{\pi}$$

где $\lambda(A) := $ площадь множества A

Определение площади A для всех $A \subset \Omega$ проблематично:

- пространство Ω, наш круг для дартс в $\mathbb{R}^2$, содержит много подмножеств, что производит странные явления
- Парадокс Банаха — Тарского

Решение: не принимайте множество событий за все подмножества Ω

Возьмите множество событий как определенные "хорошие" подмножества Ω, обозначенные $\mathscr{F}$

Присваивайте вероятности только подмножествам Ω в $\mathscr{F}$

Сигма-алгебра

Как мы можем гарантировать, что $\mathscr{F}$ достаточно большой? В разумной вероятностной модели мы в идеале хотим:

- событие "не A" принадлежит $\mathscr{F}$, если $A \in \mathscr{F}$
- событие "A или B" принадлежит $\mathscr{F}$, если $A \in \mathscr{F}$ и $A \in \mathscr{F}$

Формально, $\mathscr{F}$ — это σ-**алгебра** множества Ω, если

1. $A \in \mathscr{F} \implies A^c \in \mathscr{F}$,
2. $A_1, A_2, \ldots \in \mathscr{F} \implies \cup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathscr{F}$ и
3. $\Omega \in \mathscr{F}$

1. - 3. подразумевают, что $\varnothing \in \mathscr{F}$, если $\mathscr{F}$ — σ-алгебра

Событие $\varnothing$ называется **невозможным событием**

Событие Ω называется **достоверным событием**

Пример. Множество $\{\Omega, \varnothing\}$ — σ - алгебра, называемая **тривиальной σ-алгеброй**

Борелевская σ -алгебра

σ-алгебра событий меняется от задачи к задаче

В $\mathbb{R}^N$ мы используем Борелевские множества, обозначенные $\mathscr{B}(\mathbb{R}^N)$

- наименьшая σ-алгебра, содержащая все прямоугольники в $\mathbb{R}^N$

Почему Борелевская σ-алгебра?

- исключает "странные" множества
- включает повседневные полезные множества (включая плоскости и гиперплоскости, круги, сферы, многоугольники, конечные множества и последовательности точек)

Вероятности

Для данного события $B \in \mathscr{F}$, символ $\mathbb{P}(B)$ показывает "вероятность, что событие B случится"

> *$\mathbb{P}(B)$ показывает вероятность, что когда неопределенность решена и некоторые $\omega \in \Omega$ выбраны "естественно", то утверждение $\omega \in B$ является верным*

Нам нужно установить ограничения, чтобы сделать вероятности правильными

Например, мы хотим исключить $\mathbb{P}(B) = -93$ для некоторых B

Пусть Ω — непустое множество и $\mathscr{F}$ — σ-алгебра подпространств Ω. **Вероятность** $\mathbb{P}$ на $(\Omega, \mathscr{F})$ — функция из $\mathscr{F}$ в $[0,1]$, которая удовлетворяет

1. $\mathbb{P}(\Omega) = 1$ и
2. $\mathbb{P}(\cup_{n=1}^{\infty} A_n) = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{P}(A_n)$ для любой непересекающейся последовательности множеств $A_1, A_2, \ldots \in \mathscr{F}$

$\mathbb{P}$ также называется **вероятностной мерой**; втроем $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$ называются **вероятностным пространством**

Аксиома 1.: мы требуем $\mathbb{P}(\Omega) = 1$, так как, по построению, любая возможная ω лежит в множестве Ω.

Аксиома 2. называется **счетной аддитивностью**

В формулировке аксиомы (ii) несовместность попарна: любая различная пара A_i, A_j не имеет общих точек

Счетная аддитивность подразумевает конечную **аддитивность**:

$$\mathbb{P}(A_1 \cup \cdots \cup A_k) = \mathbb{P}(A_1) + \cdots + \mathbb{P}(A_k) \tag{1}$$

всякий раз, когда $A_1, \ldots, A_k$ несовместные

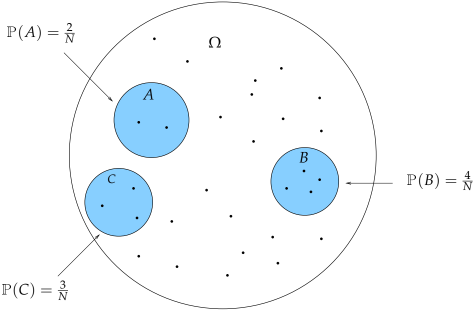

Рис.: Каждая из N точек случается с вероятностью $1/N$

$$\mathbb{P}(A \cup B \cup C) = \frac{9}{N} = \mathbb{P}(A) + \mathbb{P}(B) + \mathbb{P}(C)$$

Пример. Пусть $\Omega := \{1, \dots, 6\}$ представляют шесть разных граней кубика, как в примере ??

Так как Ω конечна, пусть $\mathscr{F}$ — множество всех подмножеств Ω

Определим вероятность $\mathbb{P} : \mathscr{F} \to [0, 1]$

$$\mathbb{P}(A) := \frac{|A|}{6} \quad \text{, где } |A| := \text{ количество элементов в множестве } A \tag{2}$$

Легко заметить, что $0 \leq \mathbb{P}(A) \leq 1$ для любых $A \in \mathscr{F}$ и что $\mathbb{P}(\Omega) = 1$

Пример. (прод.) Касательно аддитивности, предположим, что A и B — два несовместных подмножества $\{1,\ldots,6\}$

Тогда $|A \cup B| = |A| + |B|$, значит

$$\mathbb{P}(A \cup B) = \frac{|A \cup B|}{6} = \frac{|A| + |B|}{6} = \frac{|A|}{6} + \frac{|B|}{6} = \mathbb{P}(A) + \mathbb{P}(B)$$

Это доказывает аддитивность для пар множеств. Аналогичный аргумент подтверждает аддитивность для любого конечного набора

Конечная аддитивность в этом случае эквивалентна счетной аддитивности, поскольку общее количество различных событий конечно.

Пример.

Чип памяти состоит из миллиардов переключателей/битов

- Переключатели могут быть выключены или включены (0 или 1)

Генератор случайных чисел обращается к N битам, включая или выключая каждый из них

Получается

- $\Omega := \{(b_1, \ldots, b_N) :$ где b_n равняется 0 или 1 для каждого $n\}$
- $\mathbb{P}(A) := 2^{-N}(\#A)$

Упражнение: Покажите, что $\mathbb{P}$ — вероятность

Пример. Рассмотрим снова модель мишени, где Ω — это единичный круг в $\mathbb{R}^2$

Для пространства событий, возьмем $\mathscr{F}$ как множество Борелевских подмножеств в $\mathbb{R}^2$, лежащее в Ω

Для $\mathbb{P}$ мы следуем "равномерному"распределению вероятностей, заданному

То есть, $\mathbb{P}(B) = \lambda(B)/\pi$ для каждого $B \in \mathscr{F}$

Функция λ, которая назначает область для Борелевских множеств, известна как счетно-аддитивная, то есть $\lambda(\cup_n A_n) = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda(A_n)$ при условии, что эти множества несовместные

Очевидно, $\mathbb{P}(\Omega) = 1$

Мера Лебега

Функция λ, отображающая Борелевские множества на свою "территорию", формально известна как **Мера Лебега**

§?? в ET дает краткое введение в эту концепцию

Свойства вероятностной меры

Факт. (??) Пусть $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$ — вероятностное пространство и $A, B \in \mathscr{F}$

Если $A \subset B$, то

1. $\mathbb{P}(B \setminus A) = \mathbb{P}(B) - \mathbb{P}(A)$,
2. $\mathbb{P}(A) \leq \mathbb{P}(B)$ (**монотонность**)
3. $\mathbb{P}(A^c) = 1 - \mathbb{P}(A)$, и
4. $\mathbb{P}(\emptyset) = 0$.

Доказательство. Когда $A \subset B$, имеется $B = (B \setminus A) \cup A$, значит

$$\mathbb{P}(B) = \mathbb{P}(B \setminus A) + \mathbb{P}(A)$$

Все результаты следуют из этого (почему?)

Факт. (??) Если A и B — какие-нибудь (не обязательно несовместные) события, то

$$\mathbb{P}(A \cup B) = \mathbb{P}(A) + \mathbb{P}(B) - \mathbb{P}(A \cap B)$$

Докажите в качестве упражнения **??** в ЕТ

Факт подразумевает, что **полуаддитивность**: для любых $A, B \in \mathscr{F}$, имеется

$$\mathbb{P}(A \cup B) \leq \mathbb{P}(A) + \mathbb{P}(B)$$

Условная вероятность и независимость

Условная вероятность A при данном B:

$$\mathbb{P}(A \mid B) := \frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}(B)} \tag{3}$$

Вероятность A, при данной информации, что B случилось

События A и B называются **независимыми**, если $\mathbb{P}(A \cap B) = \mathbb{P}(A)\mathbb{P}(B)$

- Если A и B независимы, то

$$\mathbb{P}(A \,|\, B) := \frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}(B)} = \frac{\mathbb{P}(A)\mathbb{P}(B)}{\mathbb{P}(B)} = \mathbb{P}(A)$$

Пример. Эксперимент: бросим кубик дважды

$$\Omega := \{(i,j) : i,j \in \{1,\dots,6\}\} \quad \text{и} \quad \mathbb{P}(E) := \#E/36$$

Теперь рассмотрим события

$$A := \{(i,j) \in \Omega : i \text{ четное}\} \quad \text{и} \quad B := \{(i,j) \in \Omega : j \text{ четное}\}$$

В этом случае мы имеем

$$A \cap B = \{(i,j) \in \Omega : i \text{ и } j \text{ четные}\}$$

Упражнение: убедитесь, что $\mathbb{P}(A \cap B) = \mathbb{P}(A)\mathbb{P}(B)$

Следовательно, A и B независимы с вероятностью $\mathbb{P}$

Закон полной вероятности

Закон полной вероятности утверждает, что:

Факт. (??) Если $A \in \mathscr{F}$ и $B_1, \ldots, B_M$ — части Ω с $\mathbb{P}(B_m) > 0$ для всех m, то

$$\mathbb{P}(A) = \sum_{m=1}^{M} \mathbb{P}(A \mid B_m) \cdot \mathbb{P}(B_m)$$

Доказательство. Возьмем $A \in \mathscr{F}$ и части $B_1, \ldots, B_M$:

$$\mathbb{P}(A) = \mathbb{P}[A \cap (\cup_{m=1}^{M} B_m)] = \mathbb{P}[\cup_{m=1}^{M} (A \cap B_m)]$$

$$= \sum_{m=1}^{M} \mathbb{P}(A \cap B_m) = \sum_{m=1}^{M} \mathbb{P}(A \mid B_m) \cdot \mathbb{P}(B_m)$$

Теорема Байеса

Теорема Байеса: для любых событий A и B с положительной вероятностью, выполняется

$$\mathbb{P}(A \mid B) = \frac{\mathbb{P}(B \mid A)\mathbb{P}(A)}{\mathbb{P}(B)} \tag{4}$$

Доказательство. Из определения условной вероятности:

$$\mathbb{P}(A \mid B) = \frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}(B)} \quad \text{и} \quad \mathbb{P}(B \mid A) = \frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}(A)}$$

Следовательно $\mathbb{P}(A \cap B) = \mathbb{P}(A \mid B)\,\mathbb{P}(B) = \mathbb{P}(B \mid A)\,\mathbb{P}(A)$

Перегруппировка уравнения (4)

Пример. Банки используют автоматизированные системы для обнаружения мошеннических или незаконных транзакций

Рассмотрим тест, который отвечает на каждую транзакцию с P или N:

- P значит "положительно" (транзакция отмечена как мошенническая)
- N значит "отрицательно" (транзакция отмечена как нормальная)

Пусть F значит мошенническая, предположим

- $\mathbb{P}(P \mid F) = 0.99$ (тест отмечает 99% мошеннических транзакций),
- $\mathbb{P}(P \mid F^c) = 0.01$ (процент ложных срабатываний), и
- $\mathbb{P}(F) = 0.001$ (распространенность мошенничества)

Какова вероятность мошенничества при положительном тесте?

Обратите внимание на закон Байеса

$$\mathbb{P}(F \mid P) = \frac{\mathbb{P}(P \mid F)\mathbb{P}(F)}{\mathbb{P}(P)}$$

и обратите внимание на закон полной вероятности

$$\mathbb{P}(P) = \mathbb{P}(P \mid F)\mathbb{P}(F) + \mathbb{P}(P \mid F^c)\mathbb{P}(F^c)$$

Следовательно

$$\mathbb{P}(F \mid P) = \frac{0.99 \times 0.001}{0.99 \times 0.001 + 0.01 \times 0.999} = \frac{11}{122} \approx \frac{1}{11}$$

Случайные переменные

Неформально: "значение, которое изменяется случайным образом"

Формально: **случайная переменная** x — функция из Ω в $\mathbb{R}$

Интерпретация: случайные величины преобразуют исходы в пространстве элементарных событий в числовые исходы.

Главная идея:

- "природа" выбирает ω в Ω
- случайная переменная сообщает результат как $x(\omega) \in \mathbb{R}$

Пример. Предположим, что Ω — множество бесконечных двоичных последовательностей

$$\Omega := \{(b_1, b_2, \ldots) : b_n \in \{0,1\} \text{ для каждого } n\}$$

Мы можем создавать различные отображения случайных переменных $\Omega \to \mathbb{R}$:

- количество "подбрасываний" до первого "орла":

$$x(\omega) = x(b_1, b_2, \ldots) = \min\{n : b_n = 1\}$$

- количество "орлов" в первых 10 "подбрасываниях":

$$x(\omega) = x(b_1, b_2, \ldots) = \sum_{n=1}^{10} b_n$$

- количество подбрасываний до первого орла:

$$x(\omega) = x(b_1, b_2, \dots) = \min\{n \in \mathbb{N} : b_n = 1\}$$

- **Двоичная случайная величина или случайная величина Бернулли** говорит нам, возникают ли какие-либо орлы в первые 10 подбрасываний:

$$x(\omega) = y(b_1, b_2, \dots) := \min\left\{\sum_{n=1}^{10} b_n, 1\right\} \tag{5}$$

Случайная величина Бернулли

Бернулли или **двоичная случайная величина** с.в. x принимает значения $\{0, 1\}$

Теперь мы рассмотрим общий способ создания с.в. Бернулли

Пусть Q — утверждение, например, "a больше 3"

Определение: $\mathbb{1}\{Q\}$ равняется единице, если Q верно, в ином случае нулю.

Определим

$$x(\omega) = \mathbb{1}\{\omega \in A\} \text{ , где } A \in \mathscr{F}$$

С.в. показывает, случается ли событие C

Распространенный вариант обозначений: для произвольного $A \in \mathscr{F}$:

$$\mathbb{1}_A(\omega) := \mathbb{1}\{\omega \in A\} := \begin{cases} 1 & \text{, если } \omega \in A \\ 0 & \text{, иначе} \end{cases}$$

Факт. (??) Если $A_1, \dots, A_N$ — подмножества Ω, то

1. $\mathbb{1}_{\bigcap_{n=1}^N A_n} = \prod_{n=1}^N \mathbb{1}_{A_n}$ и
2. $\mathbb{1}_{\bigcup_{n=1}^N A_n} = \sum_{n=1}^N \mathbb{1}_{A_n}$ всякий раз, когда множества несовместные

Смотрите упражнение ?? для доказательства

Здесь равенство означает оценку при любом $\omega \in \Omega$

Условные обозначения

Общие условные обозначения для с.в.:

$$\{x \text{ обладает некоторым свойством}\} :=$$
$$\{\omega \in \Omega : x(\omega) \text{ обладает некоторым свойством}\}$$

Пример.

$$\{x \le 2\} := \{\omega \in \Omega : x(\omega) \le 2\}$$

$$\therefore \quad \mathbb{P}\{x \le 2\} := \mathbb{P}\{\omega \in \Omega : x(\omega) \le 2\}$$

Пример. Возьмем случайную величину x и $a \leq b$, мы утверждаем, что

$$\mathbb{P}\{x \leq a\} \leq \mathbb{P}\{x \leq b\}$$

Это выполняется, так как

$$\{x \leq a\} := \{\omega \in \Omega : x(\omega) \leq a\}$$

$$\subset \{\omega \in \Omega : x(\omega) \leq b\} := \{x \leq b\}$$

Теперь применим монотонность: $A \subset B \implies \mathbb{P}(A) \leq \mathbb{P}(B)$

Равенства, неравенства и арифметические операции следует интерпретировать *точечно*:

- $x \leq y \iff x(\omega) \leq y(\omega)$ для всех $\omega \in \Omega$,
- $x = y \iff x(\omega) = y(\omega)$ для всех $\omega \in \Omega$, и
- $z = \alpha x + \beta y \iff z(\omega) = \alpha x(\omega) + \beta y(\omega)$ для всех $\omega \in \Omega$

Случайные переменные — измеримые функции

Пусть $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$ — некоторое вероятностное пространство

Пусть B — некоторое подпространство $\mathbb{R}$

Рассмотрим вероятность

$$\mathbb{P}\{x \in B\} := \mathbb{P}\{\omega \in \Omega : x(\omega) \in B\}$$

где x — некоторая функция из Ω в $\mathbb{R}$

Нет возможности быть уверенным, что $\{\omega \in \Omega : x(\omega) \in B\}$ является элементом $\mathscr{F}$

- $\mathbb{P}\{x \in B\}$ может быть не определена

Мы должны ввести ограничения:

- для B мы естественно ограничиваем внимание до $\mathscr{B}(\mathbb{R})$, Борелевское подмножество $\mathbb{R}$
- для x мы требуем $\{x \in B\} \in \mathscr{F}$ всюду, где B — Борелевская множество

Формальное определение случайной величины:

Случайная величина в $(\Omega, \mathscr{F})$ — функция $x \colon \Omega \to \mathbb{R}$, удовлетворяющая

$$\{\omega \in \Omega : x(\omega) \in B\} \in \mathscr{F} \quad \text{для всех } B \in \mathscr{B}(\mathbb{R}) \tag{6}$$

Эти виды функций также называются $\mathscr{F}$-измеримыми функциями

Обозначение прообраза: $x^{-1}(B)$ — это все $\omega \in \Omega$, такие что $x(\omega) \in B$

Перепишем (6) как

$$x^{-1}(B) \in \mathscr{F} \quad \text{для всех } B \in \mathscr{B}(\mathbb{R})$$

Таким образом, x "откатывает" Борелевские множества до событий

Измеримые преобразования

Мы хотим обсудить некоторые преобразования x

Например, $y := e^x$. y тоже случайная величина?

Да, при условии, что преобразование удовлетворяет Борелевской измеримости

Формально, $f\colon \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ называется **Борелевски измеримой** или **$\mathscr{B}$-измеримой**, если

$$f^{-1}(B) \in \mathscr{B}(\mathbb{R}) \quad \text{для всех } B \in \mathscr{B}(\mathbb{R}) \tag{7}$$

Класс $\mathscr{B}$-измеримых функций огромен: любая непрерывная функция, любая возрастающая функция и т.д.

Предположим, что f $\mathscr{B}$-измерима и x — случайная величина

Мы имеем $\{y \in B\} \in \mathscr{F}$ для всех $B \in \mathscr{B}(\mathbb{R})$, так как

$$\{y \in B\} = \{f(x) \in B\} = \{x \in f^{-1}(B)\} \tag{8}$$

Таким образом, $y = f(x)$ — случайная величина

Ожидания

Мы хотим определить ожидания для произвольной с.в. x

Грубо говоря, $\mathbb{E}[x] :=$ "сумма" всех возможных значений x, взвешенных по их вероятностям.

"Сумма" в кавычках, потому что может быть бесконечное число слагаемых

Мы используем современный, формальный и строгий подход к определению ожиданий

Для конечных случайных величин дано вероятностное пространство $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$ и случайная величина x, принимающая только конечное количество различных значений $s_1, \ldots, s_J$, **ожидание** x определяется как

$$\mathbb{E}\, x = \sum_{j=1}^{J} s_j \, \mathbb{P}\{x = s_j\} \tag{9}$$

Пример. Давайте применим это определение к простейшему возможному случаю, в котором случайная величина x удовлетворяет $x(\omega) = \alpha$ для всех $\omega \in \Omega$, где α — некоторое постоянное скалярное значение. В этом случае сумма в (9) имеет только одно слагаемое и

$$\mathbb{E}x = \alpha\mathbb{P}\{x = \alpha\} = \alpha\mathbb{P}\{\omega \in \Omega : x(\omega) = \alpha\} = \alpha\mathbb{P}(\Omega) = \alpha$$

Пример. Чтобы оценить ожидание двоичной случайной величины x, мы применим (9), получаем

$$\mathbb{E}\,x = 1 \times \mathbb{P}\{x = 1\} + 0 \times \mathbb{P}\{x = 0\} = \mathbb{P}\{x = 1\}$$

Пример. Рассмотрим N подбрасываний честной монеты

Пространство элементарных событий — это $\Omega := \{0,1\}^N$, события такие, что $\mathscr{F}$:= все подмножества Ω, и $\mathbb{P}(A) := 2^{-N}|A|$ для всех $A \in \mathscr{F}$

Пусть $x(\omega) = x(b_1, \ldots, b_N) = \sum_{n=1}^{N} b_n$

Прежде всего заметьте, что $0 \leq x \leq N$

По определению $\mathbb{P}$, для любого k мы имеем $\mathbb{P}\{x = k\} = 2^{-N}|A_k|$, где

$$A_k := \{x = k\} = \left\{(b_1, \ldots, b_N) \in \Omega \ : \ \sum_{n=1}^{N} b_n = k\right\}$$

Из комбинаторики, $|A_k| = \binom{N}{k}$, где правая сторона называется **биномиальным коэффициентом** для N, k, что удовлетворяет $\sum_{k=0}^{N} k\binom{N}{k} = N2^{N-1}$ для всех N

Ожидания x:

$$\mathbb{E}\, x = \sum_{k=0}^{N} k\, 2^{-N}|A_k| = 2^{-N} \sum_{k=0}^{N} k \binom{N}{k} = \frac{N}{2}$$

Для обычного x, приблизительная произвольная случайная величина с конечными случайными величинами:

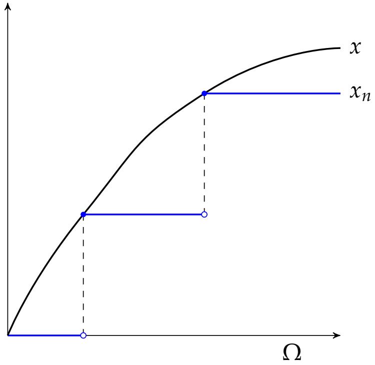

Рис.: Конечное приближение к общей случайной величине

Мы можем улучшать приближение без ограничений – Пусть x_n принимает большее и большее количество различных значений

Процесс дает последовательность *конечных* случайных величин x_n, сходящихся к x

Определим ожидания x как

$$\mathbb{E}\,x := \lim_{n\to\infty} \mathbb{E}\,x_n$$

$\mathbb{E}x$ также упоминается как **Интеграл Лебега** с.в. x относительно $\mathbb{P}$, с альтернативными обозначениями $\mathbb{E}x = \int x(\omega)\mathbb{P}(\mathrm{d}\omega)$

Существует ли последовательность аппроксимации случайной величины? Да, смотрите страницу 94 в ET и **dudley2002real**, утверждение 4.1.5

Если x принимает отрицательные значения, то пишут
$x = x^+ - x^-$

где $x^+ := \max\{x, 0\}$ и $x^- = \min\{x, 0\}$

Определим ожидания как

$$\mathbb{E}x := \mathbb{E}x^+ - \mathbb{E}x^-$$

Сфокусируемся на **интегрируемых** случайных величинах: всех случайных величинах x, таких что $\mathbb{E}|x| < \infty$

- мы имеем $x^+ \leq |x|$ и $x^- \leq |x|$
- таким образом, $\mathbb{E}x := \mathbb{E}x^+ - \mathbb{E}x^-$ хорошо определены (почему?)

Свойства ожидания

Факт. (??) Возьмем любое вероятностное пространство $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$, в нем существует однозначно определенная функция $\mathbb{E}$, что отображает каждую интегрируемую случайную величину x на $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$ в качестве значения

$$\mathbb{E}x = \int x(\omega)\mathbb{P}(\mathrm{d}\omega) \tag{10}$$

в $\mathbb{R}$, называемой **математическим ожиданием** x. Функция имеет следующие свойства:

1. $\mathbb{E}\alpha = \alpha$ для всех $\alpha \in \mathbb{R}$
2. $\mathbb{E}\mathbb{1}_A = \mathbb{P}(A)$ для всех $A \in \mathscr{F}$
3. $x \leq y \implies \mathbb{E}x \leq \mathbb{E}y$
4. $\mathbb{E}[\alpha x + \beta y] = \alpha\mathbb{E}x + \beta\mathbb{E}y$ для всех интегрируемых x, y и констант α, β

Чтобы напомнить себе об основной вероятностной мере $\mathbb{P}$, мы можем написать $\mathbb{E}_{\mathbb{P}} x$ вместо $\mathbb{E}\, x$

Обратите внимание на выражение $\mathbb{E}\, \alpha$ понимаемое как ожидание постоянной случайной величины, равной α

- следует из 4. при $x = \mathbb{1}_{\Omega}$ и $\beta = 0$

Упражнение: проверьте 3. для $x(\omega) := \mathbb{1}\{\omega \in A\}$ и $y(\omega) := \mathbb{1}\{\omega \in B\}$

Подсказка: что означает $x \leq y$ относительно A и B?

Для дальнейших подробности и ссылок на доказательства вышеуказанного факта, смотрите страницу 96 в ET

Мы сейчас докажем, что если x — конечная случайная величина с диапазоном $\{s_j\}_{j=1}^J$ и h — любая $\mathscr{B}$-измеримая функция, то

$$\mathbb{E} h(x) = \sum_{j=1}^{J} h(s_j) \mathbb{P}\{x = s_j\} \tag{11}$$

Сначала заметьте, что $\sum_{j=1}^J \mathbb{1}\{x = s_j\} = 1$, и значит мы можем записать $h(x)$ как

$$h(x) = h(x) \sum_{j=1}^{J} \mathbb{1}\{x = s_j\} = \sum_{j=1}^{J} h(s_j) \mathbb{1}\{x = s_j\}$$

Используем линейность ожиданий:

$$\mathbb{E}h(x) = \sum_{j=1}^{J} h(s_j)\mathbb{E}\,\mathbb{1}\{x = s_j\}$$

Применение части 2. факта **??** приводит к (11)

Неравенство Чебышёва: **Факт.** (??) Для любой неотрицательной случайной величины x и любой $\delta > 0$, мы имеем

$$\mathbb{P}\{x \geq \delta\} \leq \frac{\mathbb{E}\, x}{\delta} \tag{12}$$

Распространенная разновидность неравенства Чебышева имеет вид

$$\mathbb{P}\{|x| \geq \delta\} \leq \frac{\mathbb{E}\, x^2}{\delta^2} \tag{13}$$

Смотрите упражнение **??** для доказательства

Моменты

Пусть x — случайная величина и $k \in \mathbb{N}$. Если x^k интегрируема, то

- $\mathbb{E}[x^k]$ называется **k-ым моментом** x
- $\mathbb{E}[(x - \mathbb{E}x)^k]$ называется **k-ым центральным моментом** x

Если $\mathbb{E}[|x|^k] = \infty$, то говорят, что k-ый момент не существует. Для некоторых случайных величин даже первый момент не существует

В ином случае, каждый момент существует

Факт. (??) Если k-ый момент x существует, то также существует и j-ый для всех $j \leq k$

Доказательство: Упражнение **??**

Неравенство Коши — Буняковского для случайных величин:

Факт. (??) Если x и y — случайные величины с конечным вторым моментом, то

$$|\mathbb{E}[xy]| \leq \sqrt{\mathbb{E}[x^2]\mathbb{E}[y^2]} \tag{14}$$

Вторым центральным моментом x называется **дисперсия** x:

$$\operatorname{var} x := \mathbb{E}\left[(x - \mathbb{E}\, x)^2\right]$$

Стандартное отклонение x:

$$\sigma_x := \sqrt{\operatorname{var} x}$$

Ковариация случайной величины x и y:

$$\operatorname{cov}[x, y] := \mathbb{E}\left[(x - \mathbb{E}\, x)(y - \mathbb{E}\, y)\right]$$

Факт. (??) Если x и y имеют конечные вторые моменты, то

1. $\operatorname{var} x$ и $\operatorname{cov}[x, y]$ конечны
2. $\operatorname{var} x = \mathbb{E}[x^2] - [\mathbb{E} x]^2$, и
3. $\operatorname{cov}[x, y] = \mathbb{E}[xy] - \mathbb{E}[x]\mathbb{E}[y]$

Часть 1. следует из 2.–3., неравенства Коши — Буняковского и факта ??

Части 2.–3. следуют из линейности $\mathbb{E}$ и нескольких простых манипуляций

Факт. (??) Если $x_1, \ldots, x_N$ — случайные величины и $\alpha_0, \alpha_1, \ldots, \alpha_N$ — постоянные скаляры, то

$$\operatorname{var}\left[\alpha_0 + \sum_{n=1}^{N} \alpha_n x_n\right] = \sum_{n=1}^{N} \alpha_n^2 \operatorname{var}[x_n] + 2 \sum_{n<m} \alpha_n \alpha_m \operatorname{cov}[x_n, x_m]$$

Некоторые простые выводы:

1. $\operatorname{var}[\alpha + \beta x] = \beta^2 \operatorname{var}[x]$ и
2. $\operatorname{var}[\alpha x + \beta y] = \alpha^2 \operatorname{var}[x] + \beta^2 \operatorname{var}[y] + 2\alpha\beta \operatorname{cov}[x, y]$.

Корреляция x и y:

$$\mathrm{corr}[x,y] := \frac{\mathrm{cov}[x,y]}{\sigma_x \sigma_y}$$

Если $\mathrm{corr}[x,y] = 0$, то x и y **некоррелированы**

Положительная корреляция означает, что $\mathrm{corr}[x,y]$ положительна, и отрицательная корреляция значит, что $\mathrm{corr}[x,y]$ отрицательна

Факт. (??) Возьмем любые две случайные величины x, y и положительные константы α, β, мы имеем

$$-1 \leq \mathrm{corr}[x,y] \leq 1 \quad \text{и} \quad \mathrm{corr}[\alpha x, \beta y] = \mathrm{corr}[x,y]$$

первая часть следует из факта ??; вторая — из алгебры

Лучшие линейные предсказатели

Рассмотрим задачу предсказания значения случайной величины y, учитывая знание значения второй случайной величины x

Мы ищем функцию f, такую что $f(x)$ в среднем близка к y

Для измерения последнего мы будем использовать **среднеквадратичную ошибку**, которая в данном случае составляет

$$\mathbb{E}\left[(y - f(x))^2\right]$$

В §??, чтобы получить минимизатор среднеквадратичного отклонения по всем функциям x, мы выбираем

$$f(x) = \mathbb{E}[y \mid x]$$

Здесь мы рассмотрим поиск хорошего предсказателя y среди класса "линейных" функций

$$\mathcal{H}_\ell := \{ \text{ все функции вида } \ell(x) = \alpha + \beta x \}$$

Рассмотрим:

$$\min_{\ell \in \mathcal{H}_\ell} \mathbb{E}\left[(y - \ell(x))^2\right] = \min_{\alpha,\beta \in \mathbb{R}} \mathbb{E}\left[(y - \alpha - \beta x)^2\right] \tag{15}$$

Если α и β решают (15), то функция

$$\ell^*(x) := \alpha^* + \beta^* x \tag{16}$$

называется **лучшим линейным предсказателем** y при данном x

Пример. (??) Взаимосвязь между доходностью данного актива R_a и рыночной доходностью R_m называется коэффициентом **бета**

Измеряет подверженность системному риску в отличие от нерыночного риска.

Бета R_a часто определяется как коэффициент β^* в лучшем линейном предсказании (16), когда x — это рыночная доходность и $y = R_a$

Чтобы решить (15), раскроем квадрат с правой стороны и используем линейность $\mathbb{E}$, чтобы написать целевую функцию как

$$\psi(\alpha,\beta) := \mathbb{E}\left[y^2\right] - 2\alpha\mathbb{E}\left[y\right] - 2\beta\mathbb{E}\left[xy\right] + 2\alpha\beta\mathbb{E}\left[x\right] + \alpha^2 + \beta^2\mathbb{E}\left[x^2\right]$$

Вычисление производных и решение условий первого порядка:

$$\beta^* := \frac{\operatorname{cov}[x,y]}{\operatorname{var}[x]} \quad \text{and} \quad \alpha^* := \mathbb{E}\left[y\right] - \beta^*\mathbb{E}\left[x\right] \tag{17}$$

Смотрите упр. **??**

Распределения

Возьмем случайную величину x на вероятностное пространство $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$

Вероятность, x примет значение из Борелевского множества B

$$\mathbb{P}\{x \in B\}$$

На практике, удобнее представлять вероятность как *распределение* в $\mathbb{R}$

Специфицируем Ω в $\mathbb{R}$ и возьмем множество событий в $\mathbb{R}$ как $\mathscr{B}(\mathbb{R})$

- Вероятностная мера, определенная в $\mathscr{B}(\mathbb{R})$, называется **законом** или **распределением**

Формально, распределение P — отображение из $\mathscr{B}(\mathbb{R})$ в $[0, 1]$, такое что

1. $P(\mathbb{R}) = 1$ и
2. $P(\cup_{n=1}^{\infty} B_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P(B_n)$ для любой несовместной последовательности $\{B_n\}$

Если существует Борелевское множество S с $P(S) = 1$, то мы говорим, что S является **носителем функции** P

Распределения характеризуются **функцией распределения**, или функция распределения, которой может быть любая функция $F\colon \mathbb{R} \to [0,1]$, удовлетворяющая следующим условиям:

1. монотонность: $s \leq s'$ подразумевает, что $F(s) \leq F(s')$,
2. непрерывность справа: $F(s_n) \downarrow F(s)$ всюду, где $s_n \downarrow s$, и
3. $\lim_{s \to -\infty} F(s) = 0$ и $\lim_{s \to \infty} F(s) = 1$.

Функция распределения и распределение в $\mathbb{R}$ можно поставить во взаимно однозначное соответствие

Распределение P полностью характеризуется значениями функции

$$F(s) := P((-\infty, s]) \qquad (s \in \mathbb{R}) \tag{18}$$

Факт. (??) Следующие утверждения верны:

1. Если P — любое распределение в $\mathbb{R}$, то функция F в (18) — функция распределения.
2. Возьмем любую функция распределения F в $\mathbb{R}$, существует ровно одно распределение P, удовлетворяющее (18)

Для полного доказательства, смотрите **williams1991probability**, лемма 1.6, или **dudley2002real**, теорема 9.1.1.

Здесь ограничимся демонтрацией, что функция F в (18) удовлетворяет части 1. определения функция распределения

- заметим, что $s \leq s'$ подразумевает, что $(-\infty, s] \subset (-\infty, s']$
- вспомним, что $P(A) \leq P(B)$, если $A \subset B$
- тогда мы имеем $P((-\infty, s]) \leq P((-\infty, s'])$ и $F(s) \leq F(s')$, как и было заявлено

Пример. **Одномерные нормальные распределения** или **распределения Гаусса** относятся к распределениям классов, обозначенным как функция распределения вида

$$F(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{s} \exp\left\{ -\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \mathrm{d}t \qquad (s \in \mathbb{R})$$

где $\mu \in \mathbb{R}$ и $\sigma > 0$

Мы представляем распределение, связанное с (μ, σ) с помощью $\mathrm{N}(\mu, \sigma^2)$

Распределение $\mathrm{N}(0, 1)$ называется **стандартным нормальным распределением**

Мы используем символ Φ для его функции распределения

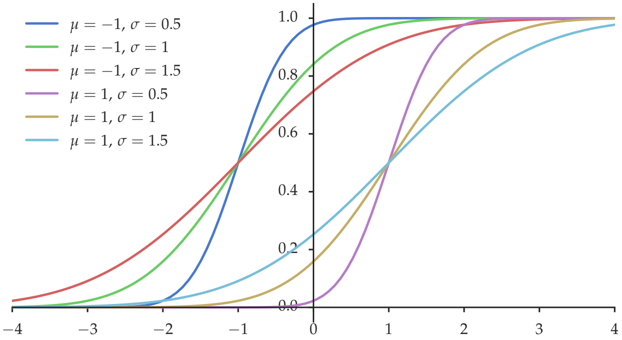

Рис.: Функция распределения для нормальных распределений

Пример. **Распределение Парето** — одномерное распределение с функция распределения вида

$$F(s) = \begin{cases} 0 & \text{, если } s < s_0 \\ 1 - \left(\frac{s_0}{s}\right)^{\alpha} & \text{, если } s_0 \leq s \end{cases} \qquad (s \in \mathbb{R},\ s_0,\ \alpha > 0)$$

Распределения Парето часто используются для моделирования явлений с тяжелым правым хвостом, таких как распределение богатства или дохода.

Пример. Класс **функции распределения бета** дан с помощью

$$F(s) = \begin{cases} 0 & \text{, если } s \leq 0 \\ \frac{1}{B(\alpha,\beta)} \int_0^s u^{\alpha-1}(1-u)^{\beta-1}\, \mathrm{d}u & \text{, если } 0 < s < 1 \\ 1 & \text{, если } 1 \leq s \end{cases}$$

где $\alpha, \beta > 0$.

В этом примере $B(\alpha,\beta)$ — **функция бета**

$$B(\alpha,\beta) := \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha+\beta)} \qquad \text{where} \qquad \Gamma(a) := \int_0^\infty u^{a-1}e^{-u}\, \mathrm{d}u$$

Функция Γ называется **функция гамма**.

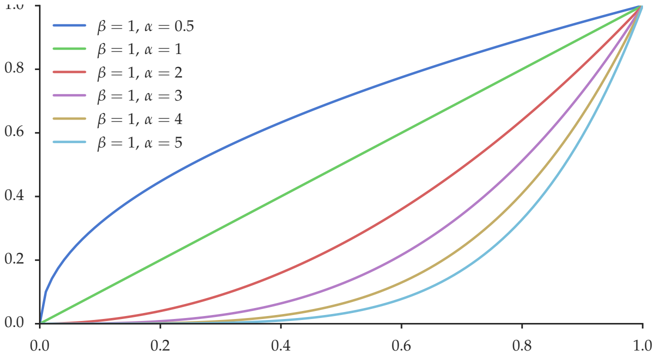

Рис.: Функции распределения бета

Пример. класс **распределений Коши** определяется как

$$F(s) = \frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{s-\tau}{\gamma}\right) + \frac{1}{2} \qquad (s \in \mathbb{R})$$

параметры $\tau \in \mathbb{R}$ и $\gamma > 0$ — параметры местоположения и масштаба соответственно

Если $\tau = 0$ и $\gamma = 1$, то F называется **стандартным распределением Коши**

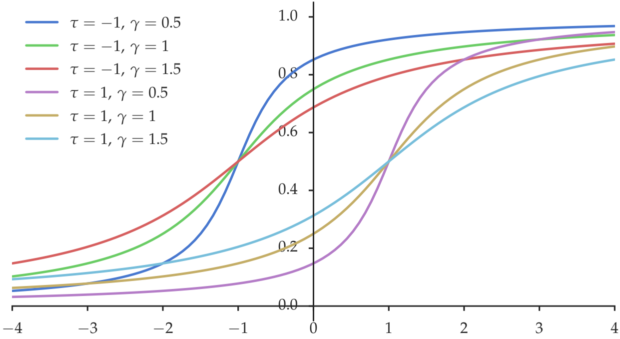

Рис.: Функции распределения Коши

Пример. Возьмем $a < b$, **равномерная функция распределения** на промежутке $[a, b]$ — это

$$F(s) = \begin{cases} 0 & \text{, если } s \leq a \\ \frac{s-a}{b-a} & \text{, если } a < s < b \\ 1 & \text{, если } b \leq s \end{cases}$$

мы обозначаем это распределение как $U[a, b]$

Плотности и функции вероятности

Два удобных частных случая

- дискретный: функция распределения просто скачет (ступенчатая функция)
- абсолютно непрерывный случай: функция непрерывна, без скачков

Дискретный случай

Распределение P называется **дискретным**, если оно имеет носитель функции в счетном множестве; that is, если существует счетное множество $\{s_j\}_{j\geq 1}$ с $P(\{s_j\}_{j\geq 1}) = 1$

для такого P пусть

$$p_j := P\{s_j\} := P(\{s_j\}) = \text{вероятность в одной точке } s_j$$

Функция вероятности — любая неотрицательная последовательность (конечная или бесконечная), сумма которой равна единице.

Упражнение: покажите, что $\{p_j\}_{j\geq 1}$ является **функцией вероятности**

Мы можем показать связь функции распределения с P как:

$$F(s) = \sum_{j \geq 1} \mathbb{1}\{s_j \leq s\} p_j \tag{19}$$

так как

$$F_x(s) := \mathbb{P}\{x \leq s\} = \mathbb{P} \bigcup_{j \text{ s.t. } s_j \leq s} \{x = s_j\}$$

$$= \sum_{j \text{ s.t. } s_j \leq s} \mathbb{P}\{x = s_j\} = \sum_{j=1}^{J} \mathbb{1}\{s_j \leq s\} p_j$$

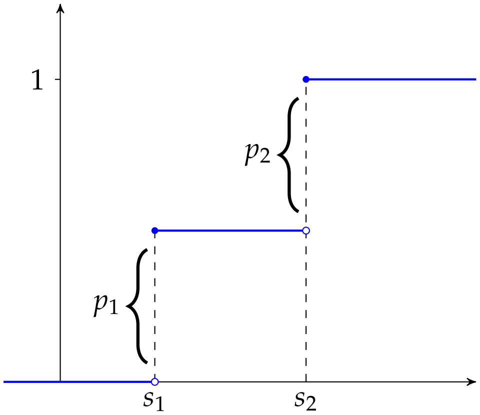

Рис.: Дискретная функция распределения

Пример. Возьмем $N \in \mathbb{N}$ и $\pi \in (0, 1)$, последовательность $\{p_0, \ldots, p_N\}$, определяемая как

$$p_j = \binom{N}{j} \pi^j (1 - \pi)^{N-j}$$

называется **биномиальной функцией вероятности**

Значение p_j — вероятность, j успехов в N независимых испытаниях, вероятность успеха каждого случая равна π

Абсолютно непрерывный случай

Функция плотности — неотрицательная функция p в $\mathbb{R}$, которая интегрируется в 1

Распределение P **определяется функцией плотности** p, если p — функция плотности и

$$P(B) = \int_B p(s)\,\mathrm{d}s \qquad \text{для всех } B \in \mathscr{B}(\mathbb{R})$$

Заметим, что

$$\int_B p(s)\,\mathrm{d}s := \int_{-\infty}^{\infty} \mathbb{1}_B(s)p(s)\,\mathrm{d}s$$

Точное необходимое и достаточное условие существования функции плотности — абсолютная непрерывность

Распределение P в Борелевских подмножествах $\mathbb{R}$ называется **абсолютно непрерывным**, если $P(B) = 0$ всюду, где мера Лебега B равна нулю (смотрите §**??**)

- Любое счетное подмножество $\mathbb{R}$ имеет меру Лебега равную нулю

Факт. (**??**) Если P абсолютно непрерывная, то $P(C) = 0$ всюду, где C счетно

Если распределение абсолютно непрерывно:

- вероятность в каждой точке равна нулю
- соответствующая функция распределения не содержит скачков
- теорема Ньютона — Лейбница говорит, что $F(s)$ дифференцируема во всех точках непрерывности p, и:

$$F'(s) = p(s) \qquad \text{для всех } s \in \mathbb{R}, \text{ таких что } p \text{ непрерывна в } s$$

Пример. Нормальные функции распределения дифференцируемы для всех μ, σ, с функцией плотности

$$p(s) = F'(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{(s-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

Мы используем символ ϕ для стандартного нормального распределения

Рис.: Функции плотности нормального распределения

Пример. Функция распределения Коши имеет функцию плотности

$$p(s) = \frac{1}{\pi\gamma}\left[1 + \left(\frac{s-\tau}{\gamma}\right)^2\right]^{-1} \qquad (s \in \mathbb{R},\ \gamma > 0,\ \tau \in \mathbb{R})$$

Функции плотности Коши более остроконечны около своих мод и имеют большую массу в хвосте, чем нормальная функция плотности

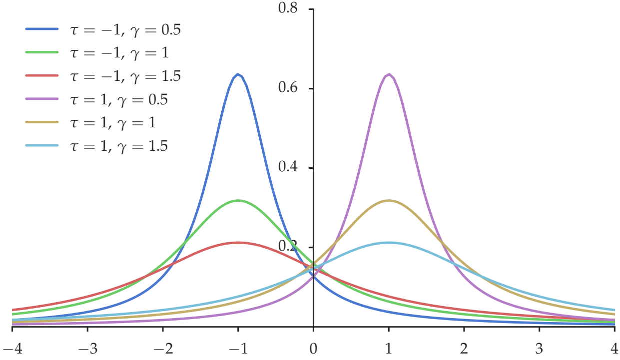

Рис.: Функции плотности Коши

Пример. Бета имеет функцию плотности, определяемую как

$$p(s) = \frac{s^{\alpha-1}(1-s)^{\beta-1}}{B(\alpha,\beta)} \qquad (\alpha,\beta > 0)$$

Когда $0 < s < 1$ и 0 в ином случае

Пример. $U[a,b]$ распределение представлено функцией плотности

$$p(s) = \frac{1}{b-a}\mathbb{1}\{a \leq s \leq b\} \qquad (s \in \mathbb{R},\ a,\ b \in \mathbb{R},\ a < b)$$

Пример. **Гамма-распределение** с параметром формы α и параметром масштаба β — распределение с функцей плотности

$$p(s) = \frac{s^{\alpha-1}e^{-s/\beta}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} \qquad (\alpha, \beta > 0)$$

Когда $0 < s < 1$ и 0 в ином случае

Пример. **Хи-квадрат распределение с k степенями свободы** — распределение с функцией плотности

$$p(s) := \frac{1}{2^{k/2}\Gamma(k/2)} s^{k/2-1} e^{-s/2} \qquad (s > 0,\ k \in \mathbb{N})$$

Это распределение представлено символом $\chi^2(k)$

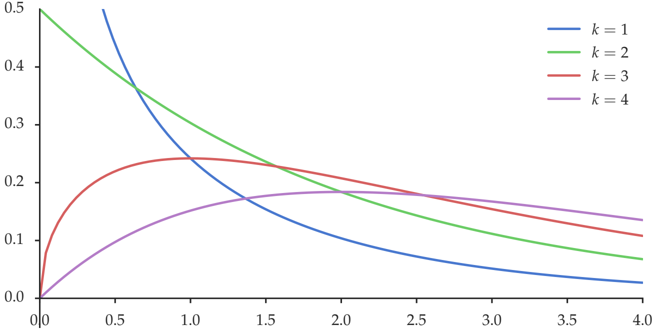

Рис.: Функции плотности хи-квадрата

Пример. **Распределение Стьюдента t с k степенями свободы**, или, проще, t-распределение с k степенями свободы, — распределение в $\mathbb{R}$ с функцией плотности

$$p(s) := \frac{\Gamma(\frac{k+1}{2})}{(k\pi)^{1/2}\Gamma(\frac{k}{2})}\left(1+\frac{s^2}{k}\right)^{-(k+1)/2} \qquad (s \in \mathbb{R},\ k > 0)$$

Пример. F-**распределение** с параметрами k_1, k_2 — распределение с функцией плотности

$$p(s) := \frac{\sqrt{(k_1 s)^{k_1} k_2^{k_2} / [k_1 s + k_2]^{k_1+k_2}}}{sB(k_1/2, k_2/2)} \qquad (s \geq 0,\ k_1,\ k_2 > 0)$$

F-распределение возникает при проверке ряда гипотез, как обсуждается ниже.

Интегрирование

Рассмотрим обычный интергал $\int_a^b h(s)\,\mathrm{d}s$ функции h на некотором интервале $[a, b]$

Предположим, мы хотим сделать этот интергал взвешенным, придав больше массы различным частям $[a, b]$:

$$\int_a^b h(s)p(s)\,\mathrm{d}s$$

Например:

- h — функция благосостояния и p плотность агентов
- p — плотность, указывающая на вероятности исходов, h функция прибыли

Предположим, что P не имеет функции плотности, но мы все еще хотим взвесить интеграл с помощью P

- мы хотим определить $\int h(s)P(\mathrm{d}s)$

Возьмем распределение P в $\mathbb{R}$ и рассмотрим $(\mathbb{R}, \mathscr{B}(\mathbb{R}), P)$ как вероятностное пространство

$(\mathbb{R}, \mathscr{B}(\mathbb{R}), P)$ имеет собственный оператор ожидания $\mathbb{E}_P$

Предположим, что h — случайная величина в $(\mathbb{R}, \mathscr{B}(\mathbb{R}), P)$, тогда

$$\mathbb{E}_P h :=: \int h(s)P(\mathrm{d}s) := \text{ожидания } h \text{ при } P$$

Факт. Пусть $h\colon \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ — $\mathscr{B}$-измерима и P — распределение в $\mathbb{R}$

Если P дискретна, с функцией вероятности $\{p_j\}_{j\geq 1}$ и носителем функции $\{s_j\}_{j\geq 1}$, то

$$\int h(s)P(\mathrm{d}s) = \sum_{j\geq 1} h(s_j)p_j$$

Если P абсолютно непрерывно с функцией плотности p, то

$$\int h(s)P(\mathrm{d}s) = \int_{-\infty}^{\infty} h(s)p(s)\,\mathrm{d}s$$

Распределения и случайные переменные

Каждая случайная переменная определяет распределение on $\mathbb{R}$

Пусть x — случайная величина на некотором вероятностном пространстве $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$:

- вероятность $\mathbb{P}\{x \in B\}$ определена для каждого $B \in \mathscr{B}(\mathbb{R})$ (смотрите (6))
- множество функций P определено как

$$P(B) = \mathbb{P}\{x \in B\} \qquad (B \in \mathscr{B}(\mathbb{R})) \tag{20}$$

является **распределением** x

Функция распределения соответствующая распределению P случайной переменной x удовлетворяет

$$F(s) = \mathbb{P}\{x \leq s\} \qquad (s \in \mathbb{R}) \tag{21}$$

мы пишем $\mathcal{L}(x) = F$, чтобы подчеркнуть, что F означает распределение x

Факт. (??) Если $\mathcal{L}(x) = F$, то $\mathbb{P}\{a < x \leq b\} = F(b) - F(a)$ для любых $a \leq b$

Доказательство выполните в качестве упражнения (или смотрите страницу 111 в ET)

Для каждой функции распределения F, существует вероятностное пространство $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$ и случайная величина $x\colon \Omega \to \mathbb{R}$, такая что $\mathcal{L}(x) = F$; §**??** показывает построение

Если $\mathcal{L}(x) = P$ и P имеет функцию плотности p, мы говорим, что x **имеет функцию плотности** p

Если распределение x дискретно, мы будем называть x **дискретной случайной величиной**

Факт. Если x имеет функцию плотности, то $\mathbb{P}\{x = s\} = 0$ для всех $s \in \mathbb{R}$, и для любых $a < b$,

$$\mathbb{P}\{a < x < b\} = \mathbb{P}\{a < x \leq b\}$$

$$= \mathbb{P}\{a \leq x < b\} = \mathbb{P}\{a \leq x \leq b\}$$

Распределения преобразований

Факт. (??) Если $\mathcal{L}(x) = F$ и $y := \psi(x)$, где $\psi\colon \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ строго возрастает, то $\mathcal{L}(y) = G$, где $G(s) := F(\psi^{-1}(s))$.

Доказательство. При таких гипотезах ψ^{-1} существует и (медленно) возрастает. Следовательно

$$\mathbb{P}\{y \leq s\} = \mathbb{P}\{\psi(x) \leq s\} = \mathbb{P}\{x \leq \psi^{-1}(s)\} = F(\psi^{-1}(s))$$

Заметьте, как монотонность используется во втором равенстве

Пример. Если $\mathcal{L}(x) = F$ и $y := \exp(x)$, то функция распределения y — это $G(s) := F(\ln(s))$

Факт. (??) Если x имеет плотность p в $\mathbb{R}$ и $y := \psi(x)$, где ψ — диффеоморфизм в $\mathbb{R}$, то распределение y абсолютно непрерывное с функцией плотности

$$q(s) = p(\psi^{-1}(s)) \left| \frac{\mathrm{d}\psi^{-1}(s)}{\mathrm{d}s} \right| \qquad (s \in \mathbb{R})$$

термин **диффеоморфизм** значит, что ψ — биекция в $\mathbb{R}$ и оба ψ и его обратное дифференцируемы

Пример. Если x имеет функцию плотности p в $\mathbb{R}$, и μ и σ — константы с $\sigma > 0$, то функция плотности $y := \mu + \sigma x$ — это

$$q(s) = p\left(\frac{s-\mu}{\sigma}\right)\frac{1}{\sigma} \qquad (s \in \mathbb{R})$$

Когда x стандартное нормальное: $y = \mu + \sigma x$ is $\mathrm{N}(\mu, \sigma^2)$

Почему?

- Возьмем p функцию плотности стандартного нормального распределения ϕ
- Вспомним

$$p(s) = F'(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left\{-\frac{(s-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

Пусть x — случайная величина в вероятностном пространстве $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$

Распределение x кодирует всю информацию для расчета ожидания x или любого $\mathscr{B}$-измеримого преобразования $h(x)$

Во-первых, пусть x конечно. Предположим, что

- $\mathcal{L}(x) = P$
- функция $h\colon \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ — любая $\mathscr{B}$-измеримая функция
- P помещает все вероятности в конечное множество $\{s_j\}_{j=1}^J$

Исспользуем $\mathbb{P}\{x = s_j\} = P\{s_j\}$ и определение ожиданий:

$$\mathbb{E}h(x) = \sum_{j=1}^J h(s_j)\mathbb{P}\{x = s_j\} = \sum_{j=1}^J h(s_j)P\{s_j\} = \sum_{j=1}^J h(s_j)p_j$$

Ожидания $h(x)$ в $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$ равны ожиданиям h в $(\mathbb{R}, \mathscr{B}(\mathbb{R}), P)$

Верно также и для бесконечного случая:

Факт. Пусть x — случайная величина в некотором вероятностном пространстве $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$, пусть $\mathcal{L}(x) = P$ и h — $\mathscr{B}$-измеримая функция, такая что $h(x)$ интегрируема. Ожидания $\mathbb{E}h(x)$ полностью определены h и P. В частности,

$$\mathbb{E}h(x) = \int h(s)P(\mathrm{d}s)$$

где $\int h(s)P(\mathrm{d}s)$ — ожидания h в $(\mathbb{R}, \mathscr{B}(\mathbb{R}), P)$

Пример. Пусть x — случайная величина, чье распределение P является равномерным распределением в $[a, b]$

Применить определение функции плотности равномерного распределения

$$\mathbb{E}\, x = \int sP(\mathrm{d}s) = \int sp(s)\,\mathrm{d}s = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s}{b-a} \mathbb{1}\{a \leq s \leq b\}\,\mathrm{d}s$$

Решение интеграла дает $\mathbb{E}\, x = \mu := (a+b)/2$. Дисперсия равна

$$\mathrm{var}[x] = \int (s-\mu)^2 P(\mathrm{d}s)$$

$$= \int_a^b \left(s - \frac{a+b}{2}\right)^2 \frac{1}{b-a}\,\mathrm{d}s = \frac{1}{12}(b-a)^2$$

Пример. Предположим, что $\mathcal{L}(x) = \mathrm{N}(\mu, \sigma)$

Если $\sigma > 0$, среднее значение может быть вычислено с помощью

$$\mathbb{E}\,x = \int_{-\infty}^{\infty} s \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{ -\frac{(s-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \mathrm{d}s = \mu$$

Дисперсия определяется как:

$$\mathrm{var}[x] = \int_{-\infty}^{\infty} (s-\mu)^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{ -\frac{(s-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \mathrm{d}s = \sigma^2$$

Моменты распределений

Любые две случайные величины с одинаковыми распределениями имеют одинаковые моменты

Следовательно моменты лучше всего рассматривать как свойство распределения, не как случайную величину

Таким образом, мы определяем

- **среднее** P как $\mu = \int sP(\mathrm{d}s)$,
- k**-ый момент** P как $\int s^k P(\mathrm{d}s)$,
- **дисперсию** P как $\int (s-\mu)^2 P(\mathrm{d}s)$,

и так далее

Функция квантилей

Пусть F — строго возрастающая функция распределения в $\mathbb{R}$

Возьмем $\tau \in (0,1)$, **τ-ая квантиль** F — это $\xi \in \mathbb{R}$, который является решением $F(\xi) = \tau$

Согласно нашим предположениям о F, такое ξ существует и однозначно определено

0.5-ая квантиль называется **медианой** F

Функция квантилей:

$$F^{-1}(\tau) := \text{ единственный } \xi, \text{ такой что } F(\xi) = \tau \qquad (0 < \tau < 1)$$

Пример. Функция квантилей связанная со стандартным распределением Коши — это $F^{-1}(\tau) = \tan[\pi(\tau - 1/2)]$

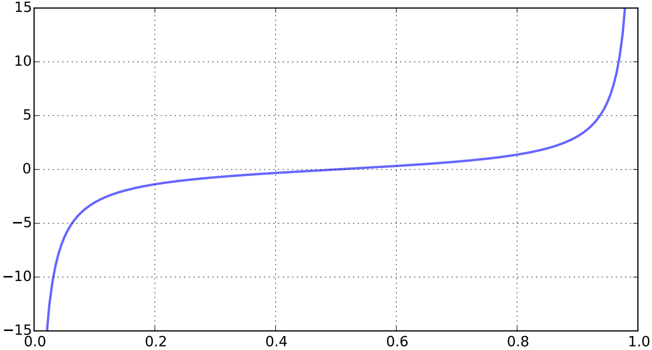

Рис.: Функция квантилей распределения Коши (горизонтальная ось — это $\tau \in (0,1)$)

Когда F не строго возрастающая, F^{-1} не определено

Мы можем задать:

$$F^{-1}(\tau) := \inf\{s \in \mathbb{R} : F(s) \geq \tau\} \qquad (0 < \tau < 1) \qquad (22)$$

Функция плотности p симметрична, если $p(s) = p(-s)$ для всех $s \in \mathbb{R}$

Распространенный сценарий проверки гипотез

Факт. (**??**) Пусть x — случайная величина с функцией плотности p. Если p симметрична, то функция распределения G $y := |x|$ определяется как

$$G(s) := \mathbb{P}\{y \leq s\} = \begin{cases} 2F(s) - 1 & \text{, если } s \geq 0 \\ 0 & \text{в ином случае} \end{cases}$$

Докажите в качестве упражнения **??**

Факт эквивалентен $F(s) = 1 - F(-s)$

Возьмем случайную величину x с $\mathcal{L}(x) = F$ и заданной константой $\alpha \in (0, 1)$

Рассмотрим c, являющийся решением $\mathbb{P}\{-c \leq x \leq c\} = 1 - \alpha$

Факт. Если $\mathcal{L}(x) = F$, x имеет симметричную функцию плотности и F — строго возрастающая, то

$$c = F^{-1}(1 - \alpha/2) \quad \Longrightarrow \quad \mathbb{P}\{-c \leq x \leq c\} = 1 - \alpha \tag{23}$$

Когда F стандартная нормальная функция распределения Φ, c обычно обозначается как $z_{\alpha/2}$:

$$z_{\alpha/2} := \Phi^{-1}(1 - \alpha/2) \tag{24}$$

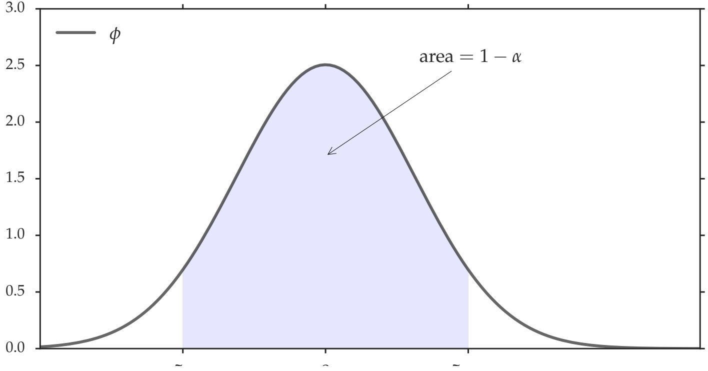

Рис.: Критические значения для стандартной нормальной плотности