

Чего хочет статистик?

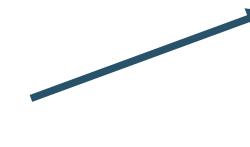
Схема математической статистики

Выборка: x_1, \dots, x_n Параметр: θ

$\hat{\theta}$



$f_{\hat{\theta}}(t)$



Точность
оценки,
прогнозов



доверительные
интервалы

Как оценить

- Метод моментов
- Метод максимального правдоподобия

Союзники

Асимптотические
(при большом n)

- ЦПТ
- Дельта-метод

Хорошие свойства

- Несмещенная
- Состоятельная
- Эффективная

Точные

- Теорема Фишера
- $\chi^2_n, t_n, F_{n,k}$
- Ещё союзники!

Ответы на
вопросы
проверка
гипотез

Схема математической статистики

Выборка: x_1, \dots, x_n Параметр: θ

$\hat{\theta}$



Как оценить

- Метод моментов
- Метод максимального правдоподобия

Хорошие свойства

- Несмещенная
- Состоятельная
- Эффективная

Союзники

Асимптотические
(при большом n)

- ЦПТ
- Дельта-метод

Точные

- Теорема Фишера
- $\chi^2_n, t_n, F_{n,k}$
- Ещё союзники!



Точность
оценки,
прогнозов

доверительные
интервалы

Ответы на
вопросы
проверка
гипотез

Несмешённость

Оценка называется несмешённой, если её математическое ожидание равно оцениваемому параметру:

$$\mathbb{E}(\hat{\theta}) = \theta$$

Несмешённость

Оценка называется несмешённой, если её математическое ожидание равно оцениваемому параметру:

$$\mathbb{E}(\hat{\theta}) = \theta$$

Смещение оценки это разница между её математическим ожиданием и её реальным значением:

$$bias(\hat{\theta}) = \mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta$$

Несмешённость

Оценка называется несмешённой, если её математическое ожидание равно оцениваемому параметру:

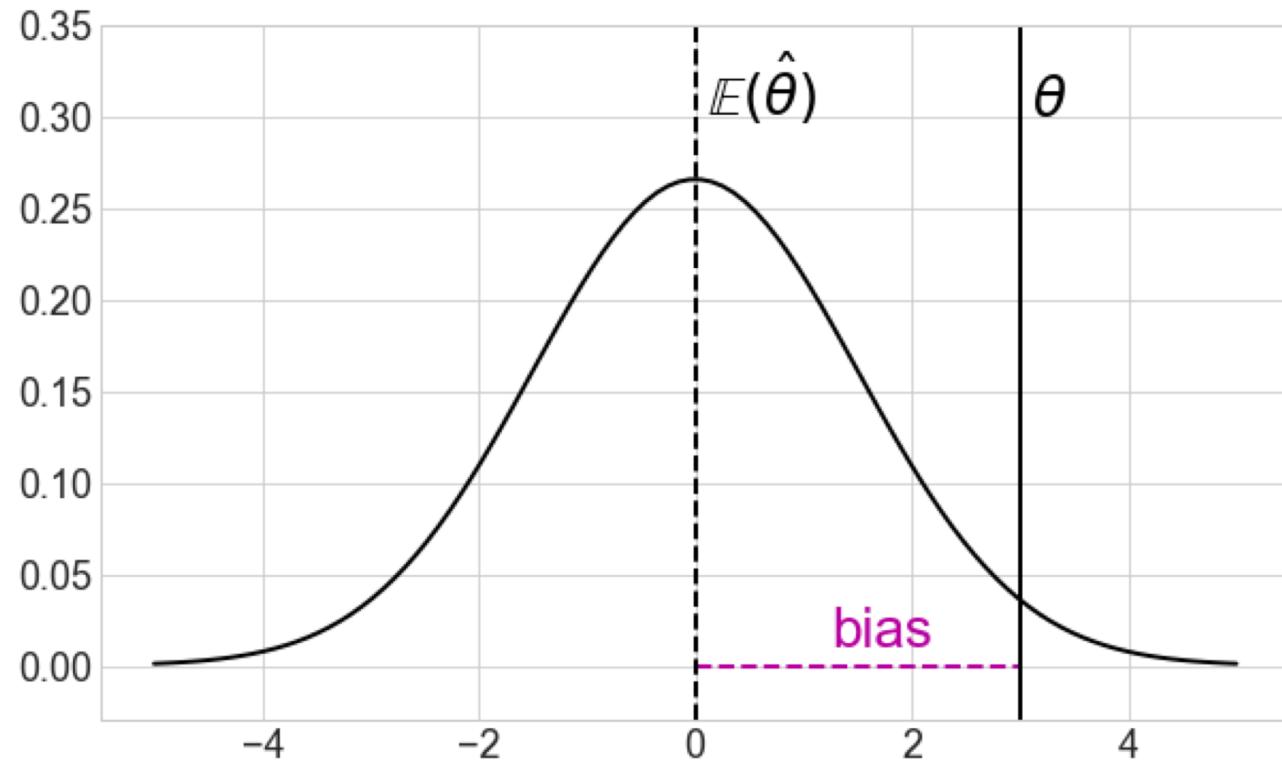
$$\mathbb{E}(\hat{\theta}) = \theta$$

Смещение оценки это разница между её математическим ожиданием и её реальным значением:

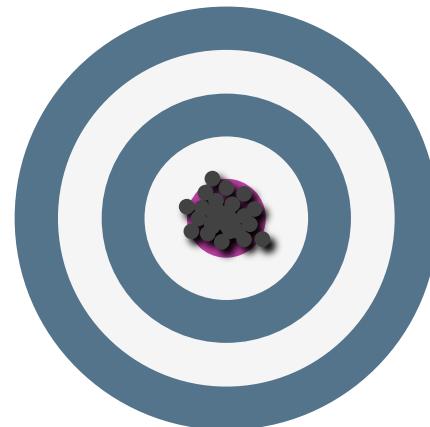
$$bias(\hat{\theta}) = \mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta$$

Простым языком: если при фиксированном n мы постоянно используем нашу оценку, в среднем мы не ошибаемся

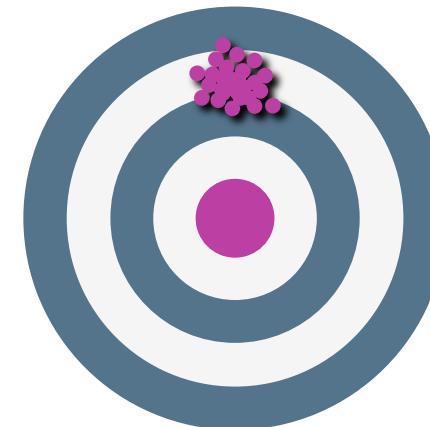
Несмешённость



Оценка 1



Оценка 2



Состоятельность

Оценка называется состоятельной, если она сходится по вероятности к истинному значению параметра при $n \rightarrow \infty$

$$\hat{\theta} \xrightarrow{p} \theta$$

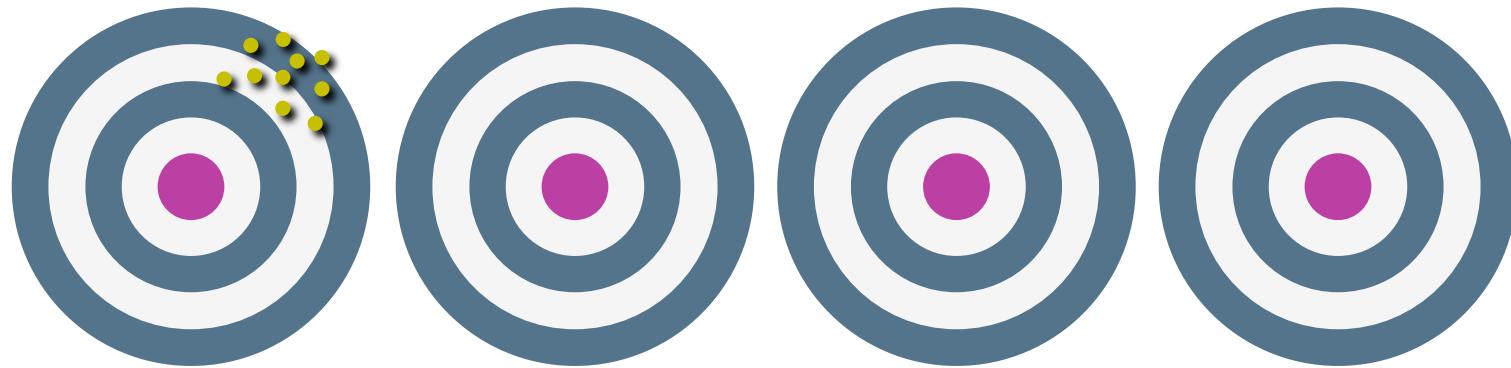
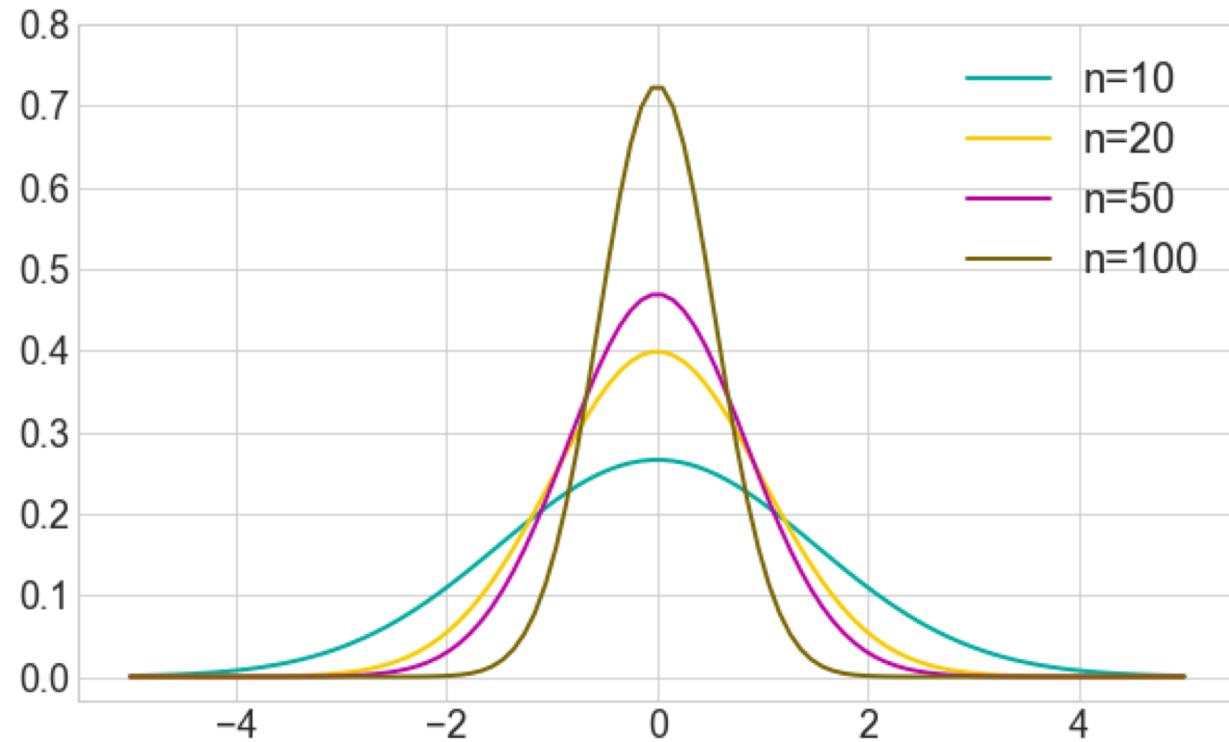
Состоятельность

Оценка называется состоятельной, если она сходится по вероятности к истинному значению параметра при $n \rightarrow \infty$

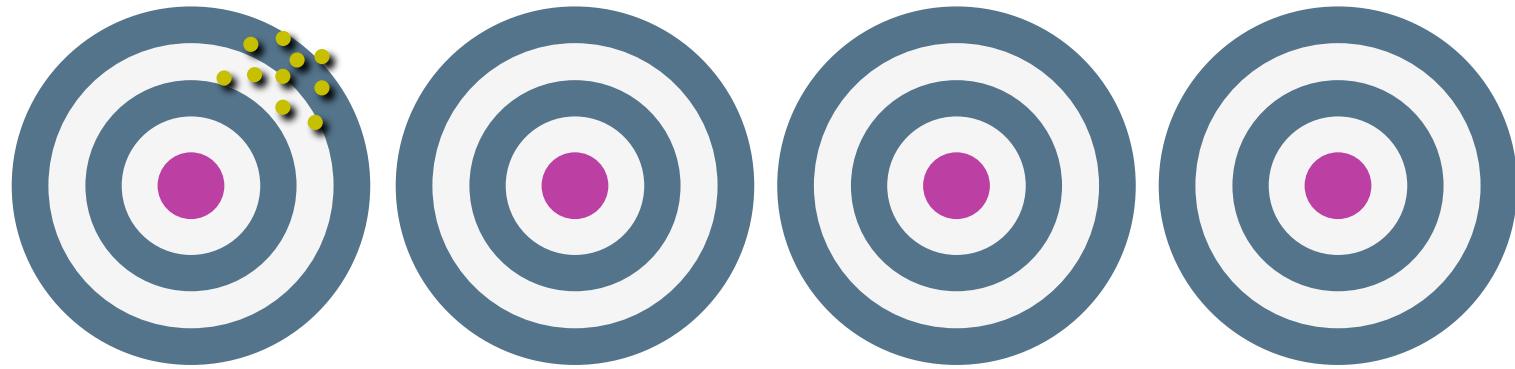
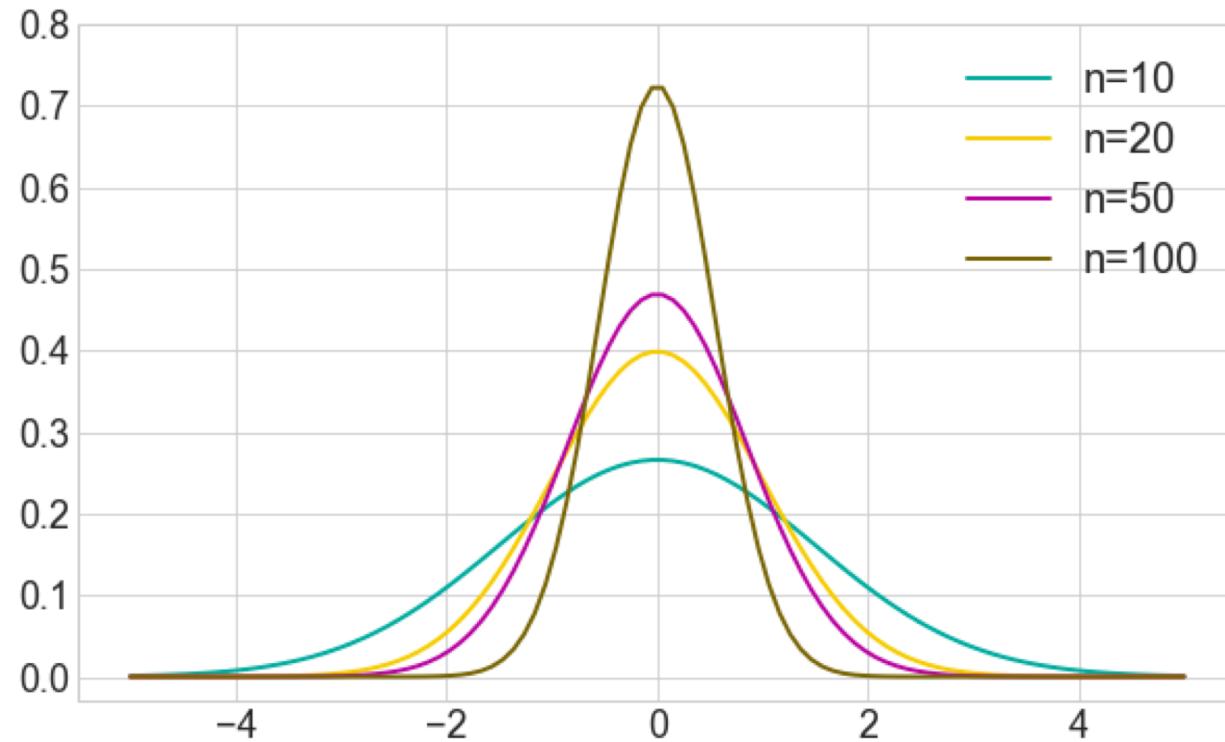
$$\hat{\theta} \xrightarrow{p} \theta$$

Простым языком: чем больше наблюдений, тем мы ближе к истине

Состоятельность

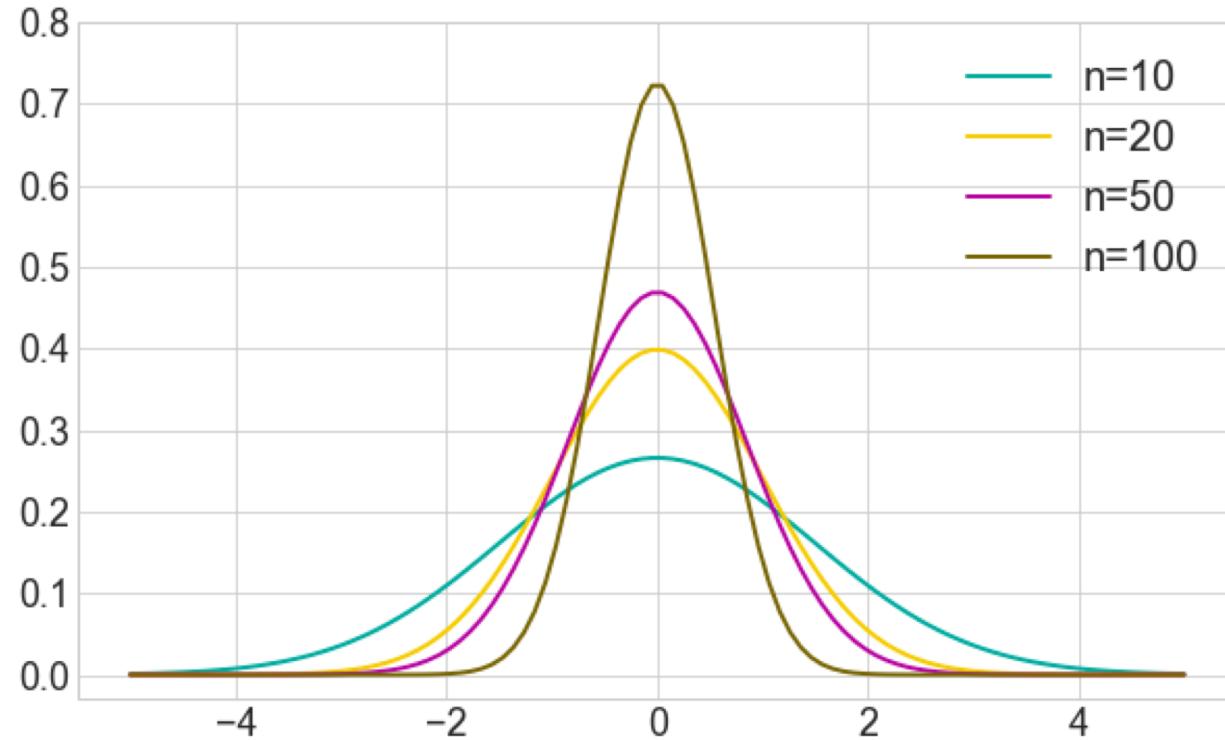


Состоятельность



$n = 10$

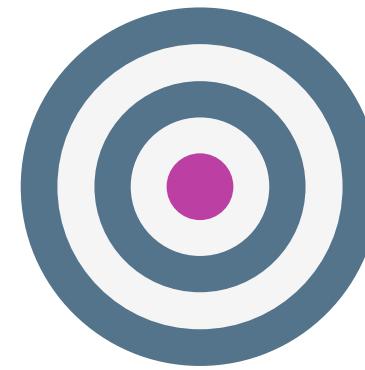
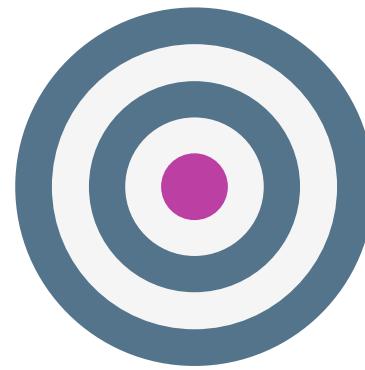
Состоятельность



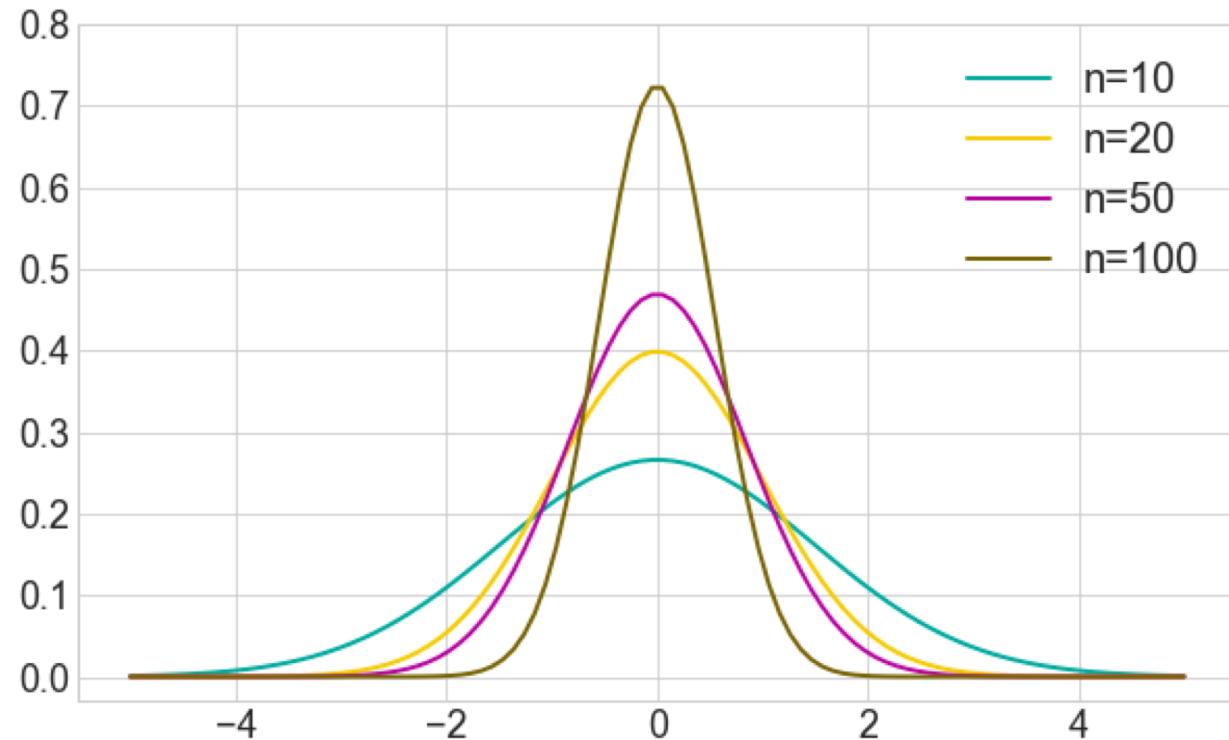
$n = 10$



$n = 20$



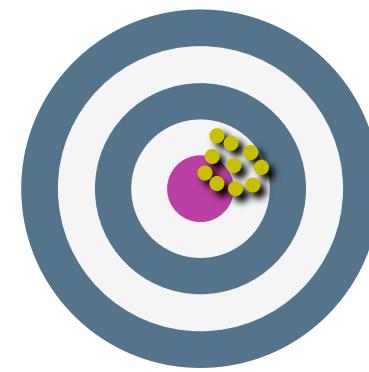
Состоятельность



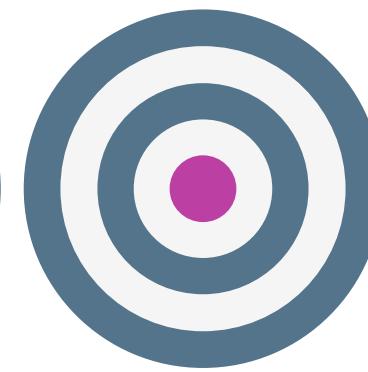
$n = 10$



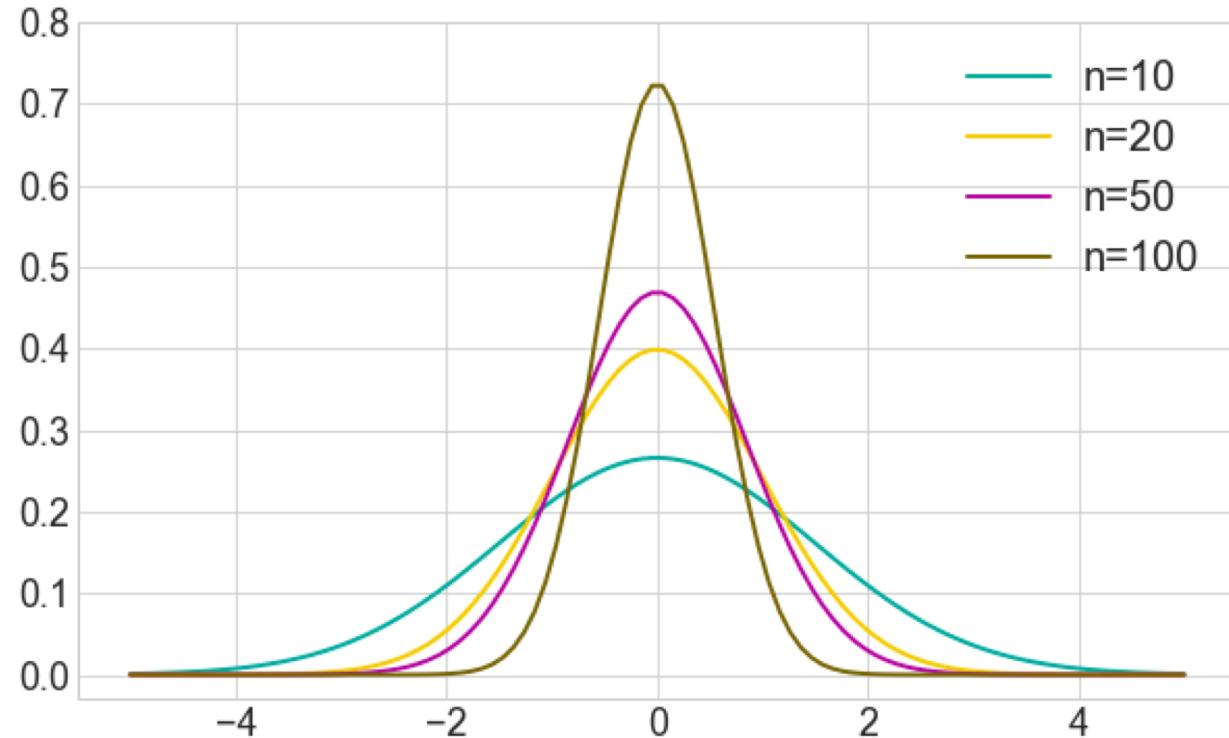
$n = 20$



$n = 50$



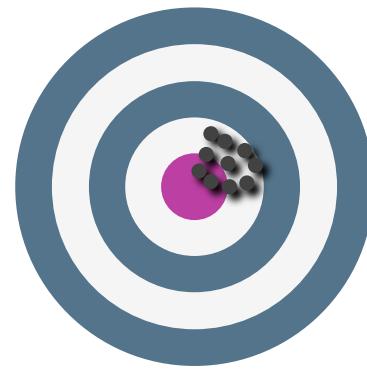
Состоятельность



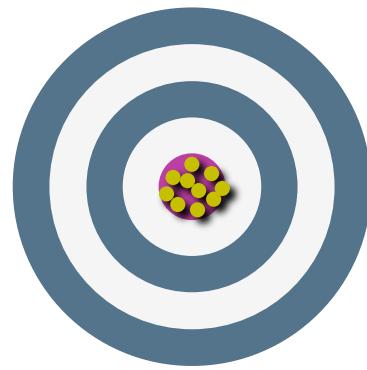
$n = 10$



$n = 20$

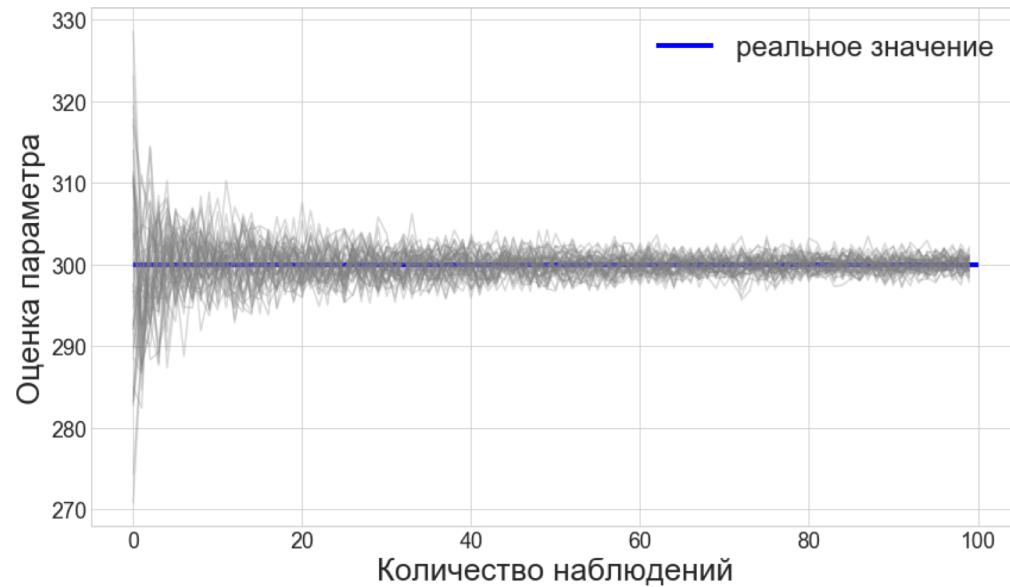


$n = 50$



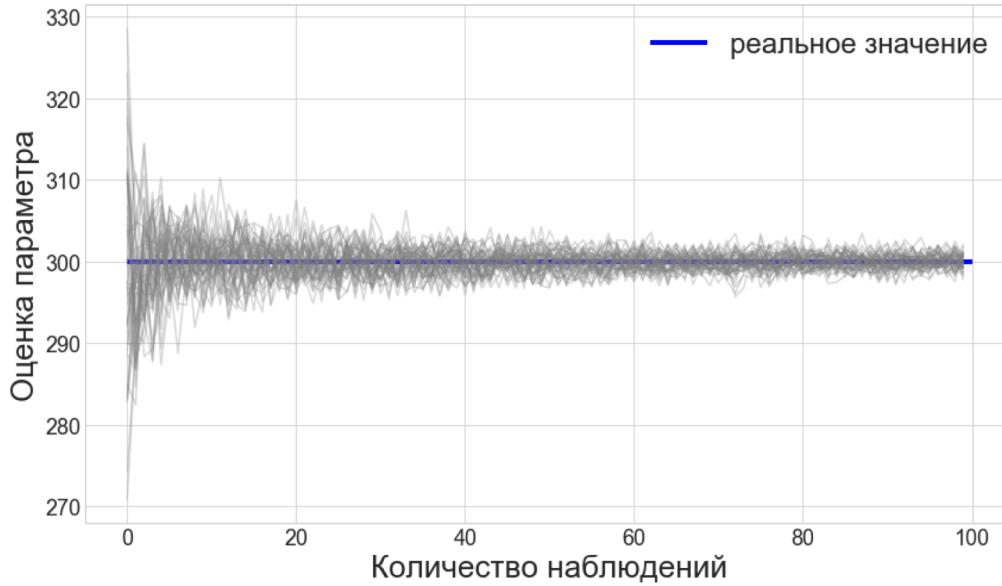
$n = 100$

Состоятельность

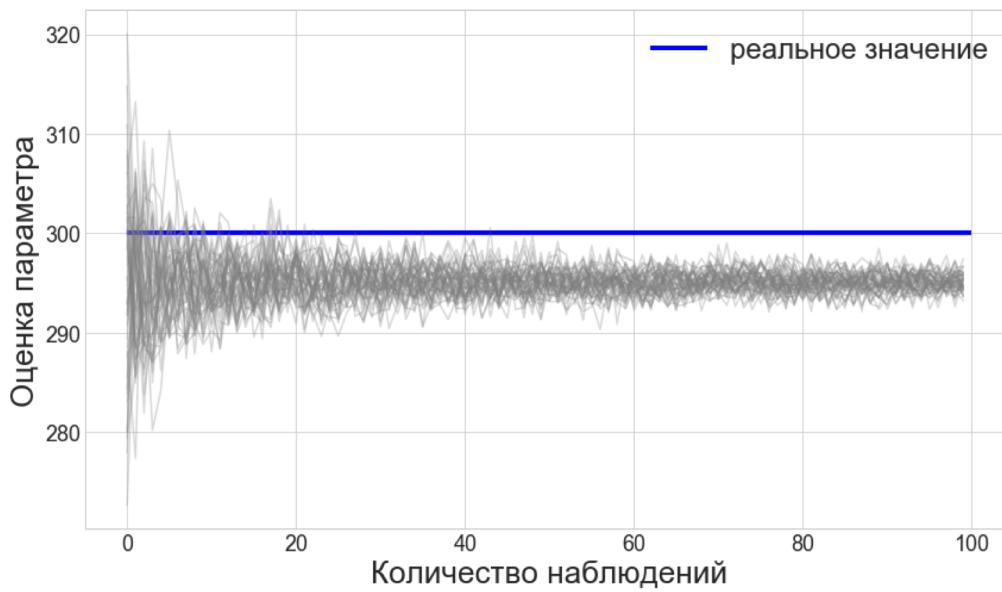


Состоятельная
оценка

Состоятельность



Состоятельная
оценка



Несостоятельная
оценка

Асимптотическая несмешённость

Оценка называется асимптотически несмешённой, если её математическое ожидание сходится к оцениваемому параметру при $n \rightarrow \infty$:

$$\mathbb{E}(\hat{\theta}) \rightarrow \theta$$

Асимптотическая несмешённость

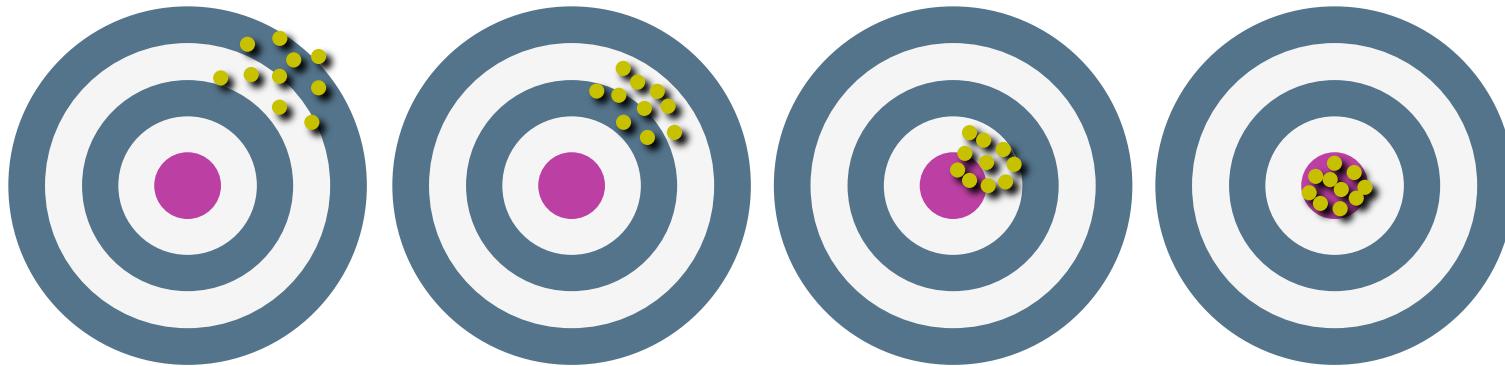
Оценка называется асимптотически несмешённой, если её математическое ожидание сходится к оцениваемому параметру при $n \rightarrow \infty$:

$$\mathbb{E}(\hat{\theta}) \rightarrow \theta$$

Простым языком: если мы постоянно используем нашу оценку, в среднем, при очень больших n , мы не ошибаемся

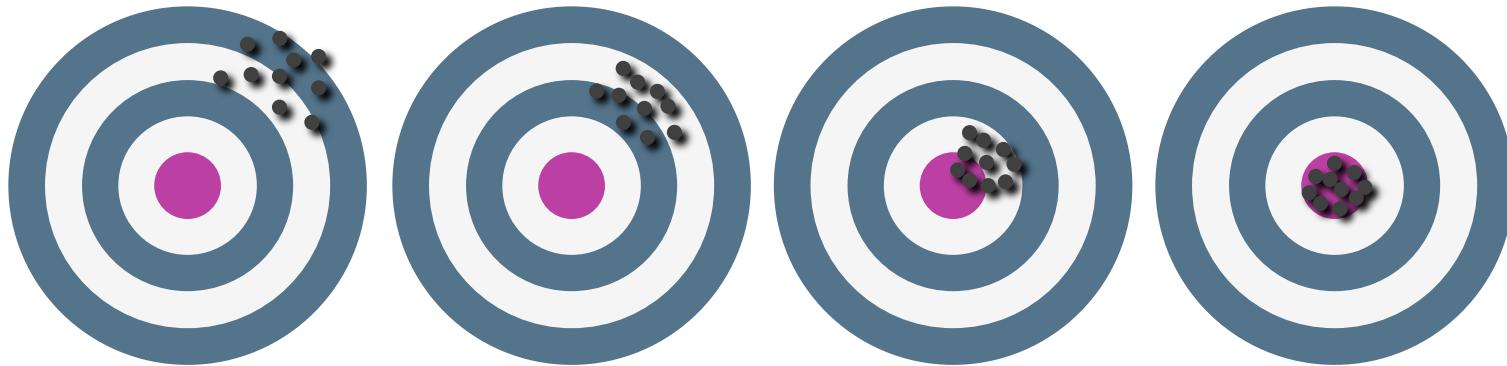
Состоятельность VS асимптотическая несмёщенность

Асимптотически несмешённая и состоятельная оценка

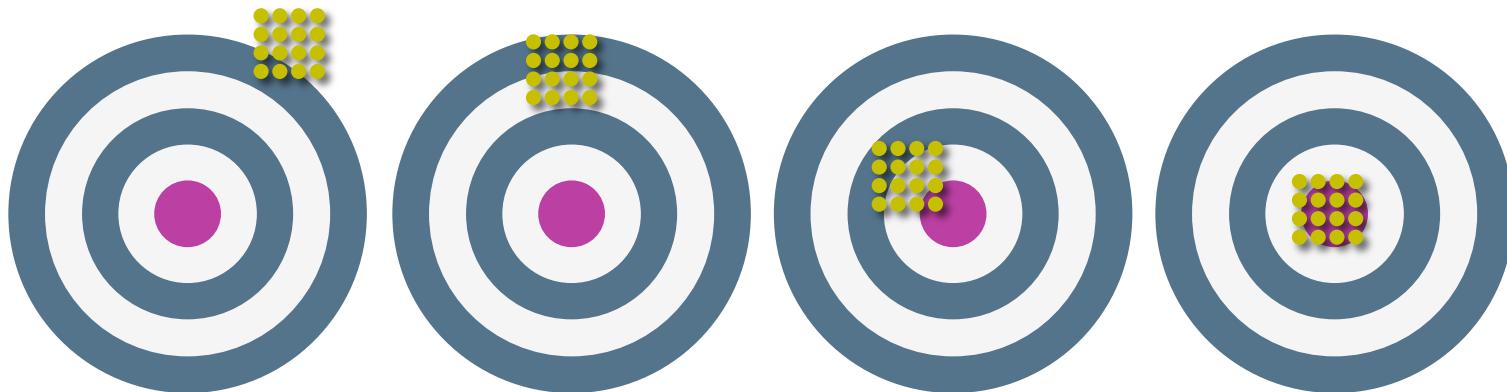


Состоятельность VS асимптотическая несмёщенность

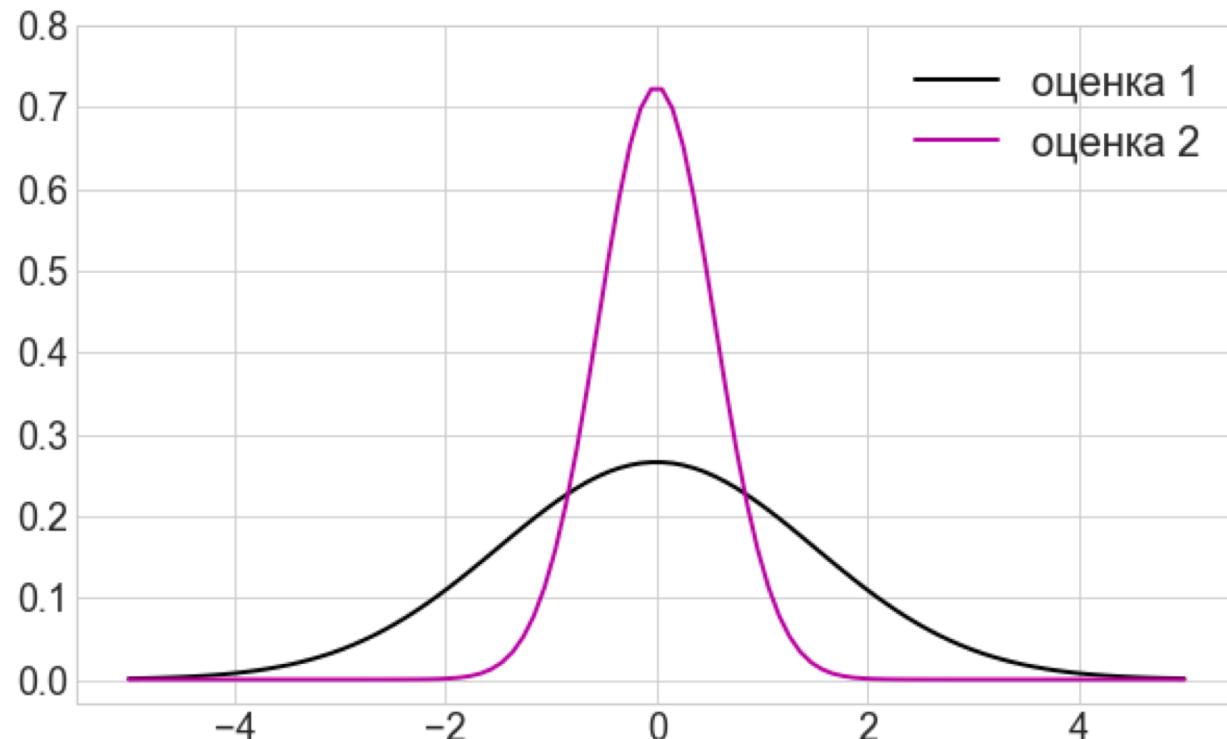
Асимптотически несмешённая и состоятельная оценка



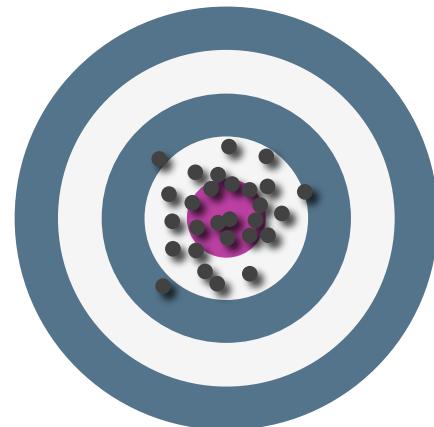
Асимптотически несмешённая, но несостоятельная оценка



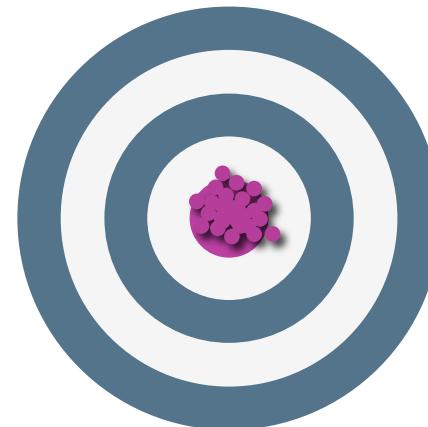
Сравнение оценок



Оценка 1



Оценка 2



Сравнение оценок

Несмешённых и состоятельных оценок может оказаться несколько \Rightarrow нужно научиться их сравнивать

Сравнение оценок

Несмешённых и состоятельных оценок может оказаться несколько \Rightarrow нужно научиться их сравнивать

Обычно оценки между собой сравнивают с помощью квадратичной ошибки:

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2$$

Сравнение оценок

Несмешённых и состоятельных оценок может оказаться несколько \Rightarrow нужно научиться их сравнивать

Обычно оценки между собой сравнивают с помощью квадратичной ошибки:

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2$$

Для несмешённых оценок MSE совпадает с дисперсией оценки

Сравнение оценок

Несмешённых и состоятельных оценок может оказаться несколько \Rightarrow нужно научиться их сравнивать

Обычно оценки между собой сравнивают с помощью квадратичной ошибки:

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2$$

Для несмешённых оценок MSE совпадает с дисперсией оценки

Простым языком: чем более предсказуема оценка, тем точнее прогноз (уже доверительный интервал)

Резюме

Статистик хочет получить:

- несмешённую оценку – хочет в среднем не ошибаться при фиксированном размере выборки

Резюме

Статистик хочет получить:

- несмешённую оценку – хочет в среднем не ошибаться при фиксированном размере выборки
- состоятельную оценку – хочет при большом числе наблюдений быть близко к реальности

Резюме

Статистик хочет получить:

- несмешённую оценку – хочет в среднем не ошибаться при фиксированном размере выборки
- состоятельную оценку – хочет при большом числе наблюдений быть близко к реальности
- оценку с маленькой средней квадратичной ошибкой

Великая дилемма: смещение против разброса

Сравнение оценок

Несмешённых и состоятельных оценок может оказаться несколько \Rightarrow нужно научиться их сравнивать

Сравнение оценок

Несмешённых и состоятельных оценок может оказаться несколько \Rightarrow нужно научиться их сравнивать

Обычно оценки между собой сравнивают с помощью квадратичной ошибки:

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2$$

Сравнение оценок

Несмешённых и состоятельных оценок может оказаться несколько \Rightarrow нужно научиться их сравнивать

Обычно оценки между собой сравнивают с помощью квадратичной ошибки:

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2$$

Для несмешённых оценок MSE совпадает с дисперсией оценки

Сравнение оценок

Несмешённых и состоятельных оценок может оказаться несколько \Rightarrow нужно научиться их сравнивать

Обычно оценки между собой сравнивают с помощью квадратичной ошибки:

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2$$

Для несмешённых оценок MSE совпадает с дисперсией оценки

Простым языком: чем более предсказуема оценка, тем точнее прогноз (уже доверительный интервал)

Разложение на смещение и разброс

Для того, чтобы сравнить оценки можно выбрать любую другую функцию потерь, но у MSE есть несколько хороших свойств

Разложение на смещение и разброс

Для того, чтобы сравнить оценки можно выбрать любую другую функцию потерь, но у MSE есть несколько хороших свойств

MSE можно представить в виде суммы смещения и разброса:

Разложение на смещение и разброс

Для того, чтобы сравнить оценки можно выбрать любую другую функцию потерь, но у MSE есть несколько хороших свойств

MSE можно представить в виде суммы смещения и разброса:

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \mathbb{E}(\hat{\theta}) + \mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta)^2 =$$

Разложение на смещение и разброс

Для того, чтобы сравнить оценки можно выбрать любую другую функцию потерь, но у MSE есть несколько хороших свойств

MSE можно представить в виде суммы смещения и разброса:

$$\begin{aligned} MSE &= \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \mathbb{E}(\hat{\theta}) + \mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta)^2 = \\ &= \mathbb{E}(\hat{\theta} - \mathbb{E}(\hat{\theta}))^2 + 2 \cdot \mathbb{E}(\hat{\theta} - \mathbb{E}(\hat{\theta})) \cdot \mathbb{E}(\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta) + \mathbb{E}(\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta)^2 = \end{aligned}$$

Разложение на смещение и разброс

Для того, чтобы сравнить оценки можно выбрать любую другую функцию потерь, но у MSE есть несколько хороших свойств

MSE можно представить в виде суммы смещения и разброса:

$$\begin{aligned} MSE &= \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \mathbb{E}(\hat{\theta}) + \mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta)^2 = \\ &= \mathbb{E}(\hat{\theta} - \mathbb{E}(\hat{\theta}))^2 + 2 \cdot \mathbb{E}(\hat{\theta} - \mathbb{E}(\hat{\theta})) \cdot \mathbb{E}(\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta) + \mathbb{E}(\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta)^2 = \\ &= Var(\hat{\theta}) + 2 \cdot (\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \mathbb{E}(\hat{\theta})) \cdot (\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta) + (\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta)^2 = \end{aligned}$$

Разложение на смещение и разброс

Для того, чтобы сравнить оценки можно выбрать любую другую функцию потерь, но у MSE есть несколько хороших свойств

MSE можно представить в виде суммы смещения и разброса:

$$\begin{aligned} MSE &= \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \mathbb{E}(\hat{\theta}) + \mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta)^2 = \\ &= \mathbb{E}(\hat{\theta} - \mathbb{E}(\hat{\theta}))^2 + 2 \cdot \mathbb{E}(\hat{\theta} - \mathbb{E}(\hat{\theta})) \cdot \mathbb{E}(\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta) + \mathbb{E}(\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta)^2 = \\ &= Var(\hat{\theta}) + 2 \cdot (\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \mathbb{E}(\hat{\theta})) \cdot (\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta) + (\mathbb{E}(\hat{\theta}) - \theta)^2 = \\ &= Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta}) \end{aligned}$$

Bias-variance decomposition

Между смещением и разбросом можно искать компромисс, это позволяет уменьшить среднеквадратичную ошибку

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta})$$

Bias-variance decomposition

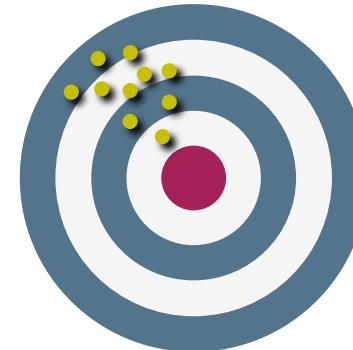
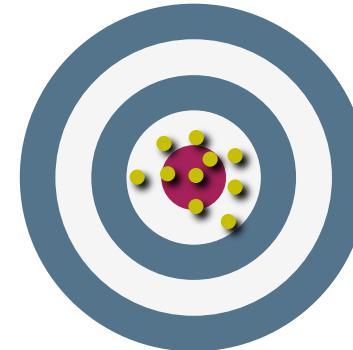
Низкий разброс

Низкое смещение



Высокий разброс

Высокое смещение



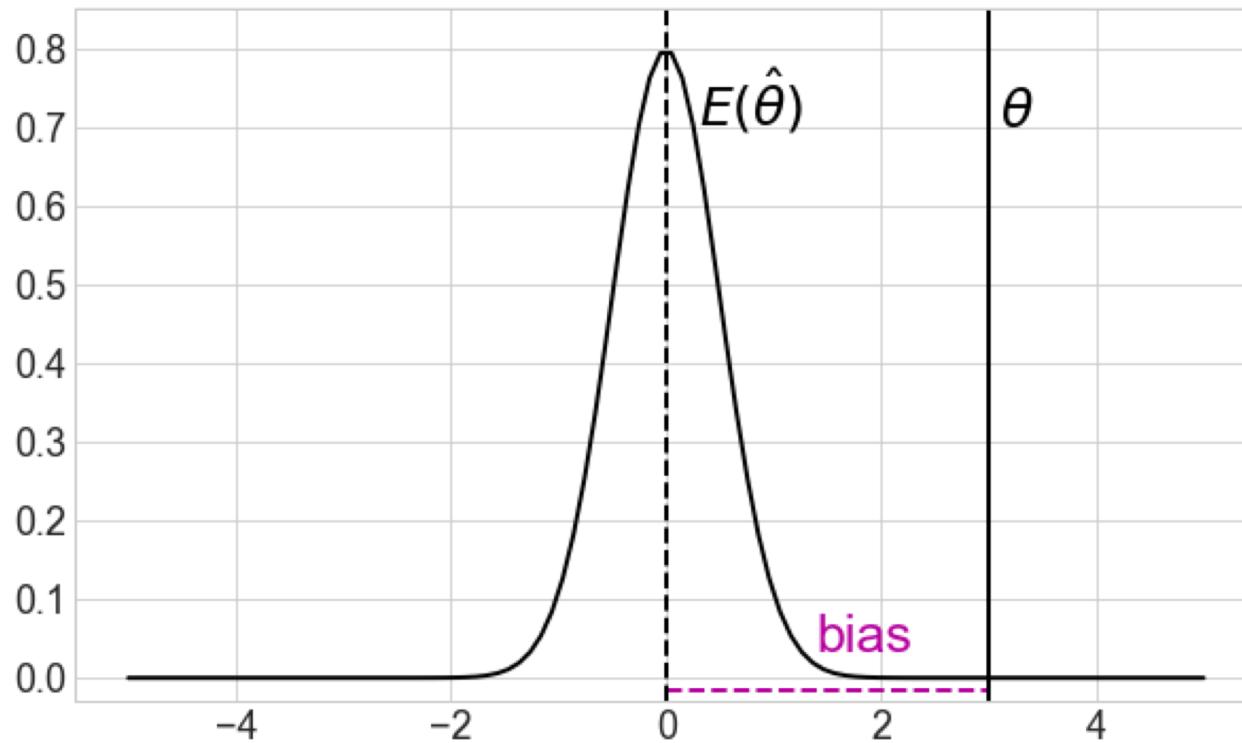
$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta})$$

Bias-variance decomposition

Высокое смещение
сильно снизило разброс



Низкое MSE



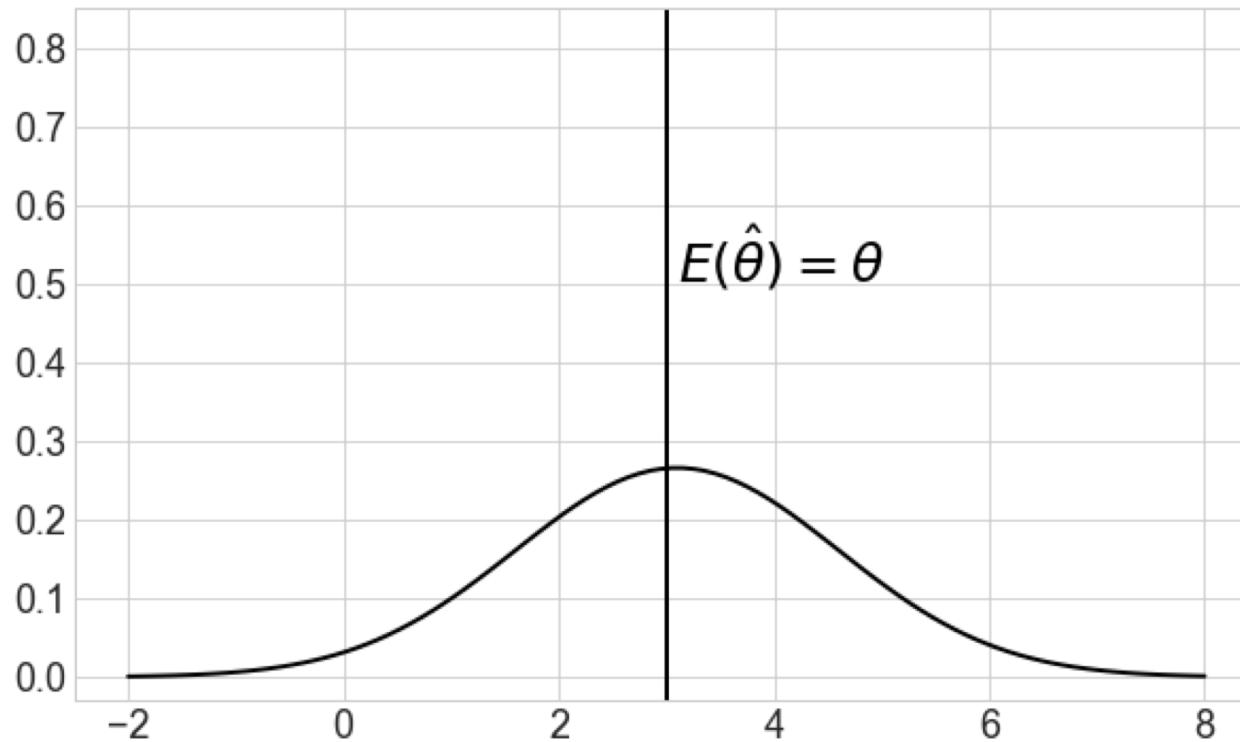
$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta})$$

Bias-variance decomposition

Несмешённая оценка
с высокой дисперсией

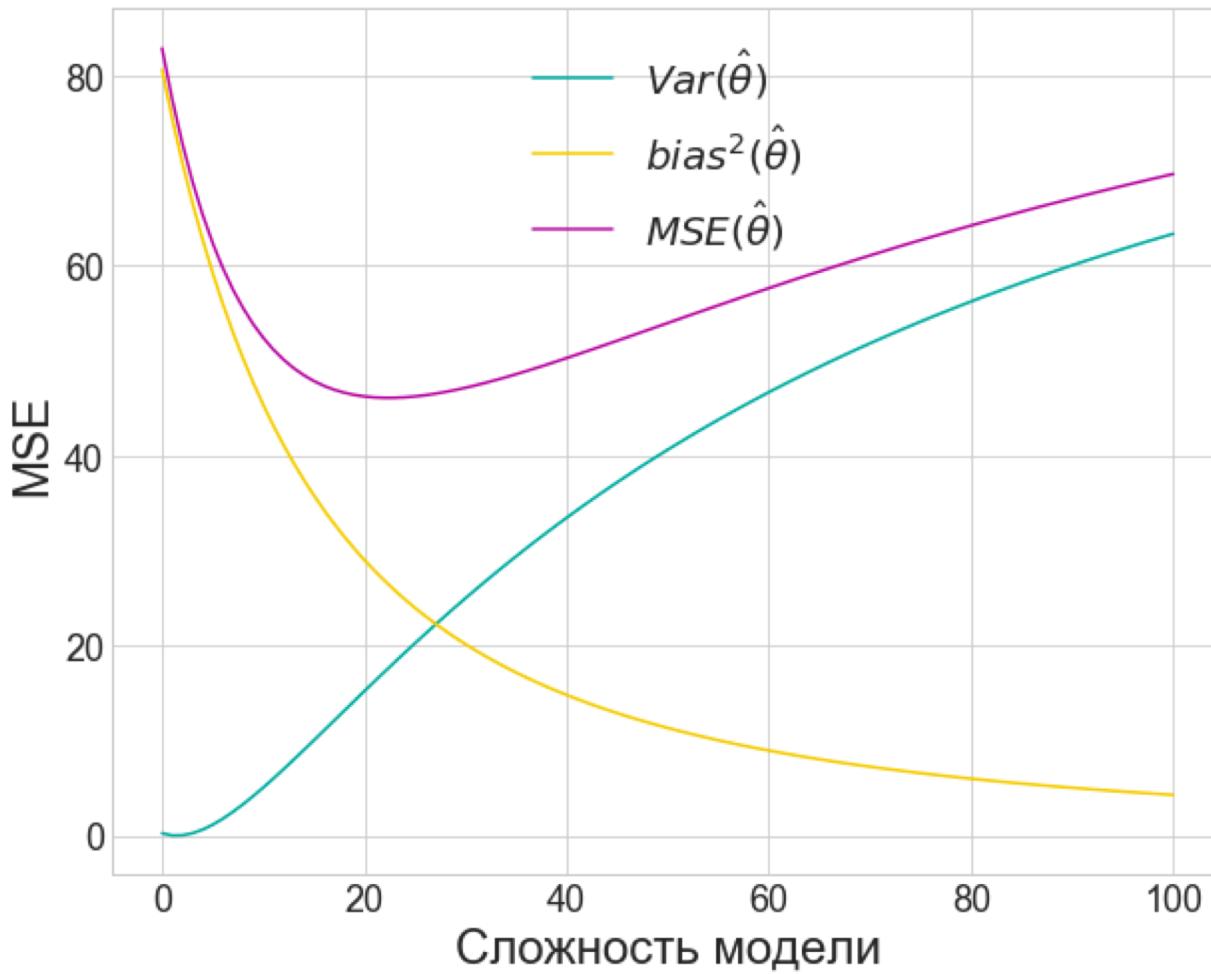


Высокое MSE



$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta})$$

Bias-variance decomposition



$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + bias^2(\hat{\theta})$$

Эффективность оценок

Эффективность

Между смещением и разбросом можно искать компромисс, это позволяет уменьшить среднеквадратичную ошибку

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta})$$

Эффективность

Между смещением и разбросом можно искать компромисс, это позволяет уменьшить среднеквадратичную ошибку

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta})$$

В классе всех возможных оценок наилучшей в смысле среднеквадратического подхода не существует

Эффективность

Между смещением и разбросом можно искать компромисс, это позволяет уменьшить среднеквадратичную ошибку

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta})$$

В классе всех возможных оценок наилучшей в смысле среднеквадратического подхода не существует

Можно попробовать зафиксировать смещение и найти оценку с наименьшей дисперсией

Эффективность

Можно попробовать зафиксировать смещение и найти оценку с наименьшей дисперсией

Эффективность

Можно попробовать зафиксировать смещение и найти оценку с наименьшей дисперсией

Такая оценка называется эффективной в классе со смещением $\text{bias}(\hat{\theta})$

Эффективность

Можно попробовать зафиксировать смещение и найти оценку с наименьшей дисперсией

Такая оценка называется эффективной в классе со смещением $\text{bias}(\hat{\theta})$

Нас будут интересовать несмешённые эффективные оценки

Эффективность

Можно попробовать зафиксировать смещение и найти оценку с наименьшей дисперсией

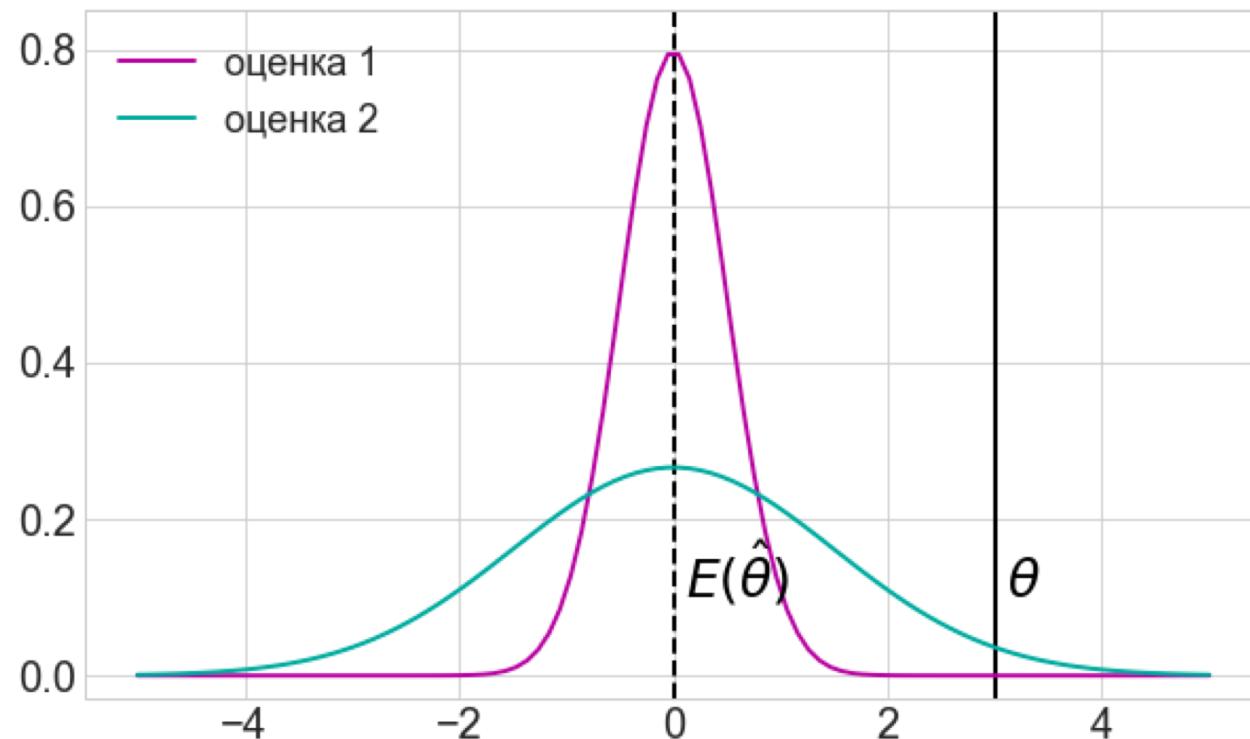
Такая оценка называется эффективной в классе со смещением $\text{bias}(\hat{\theta})$

Нас будут интересовать несмешённые эффективные оценки

Простым языком: эффективная оценка обладает самым узким доверительным интервалом в своём классе

Эффективность

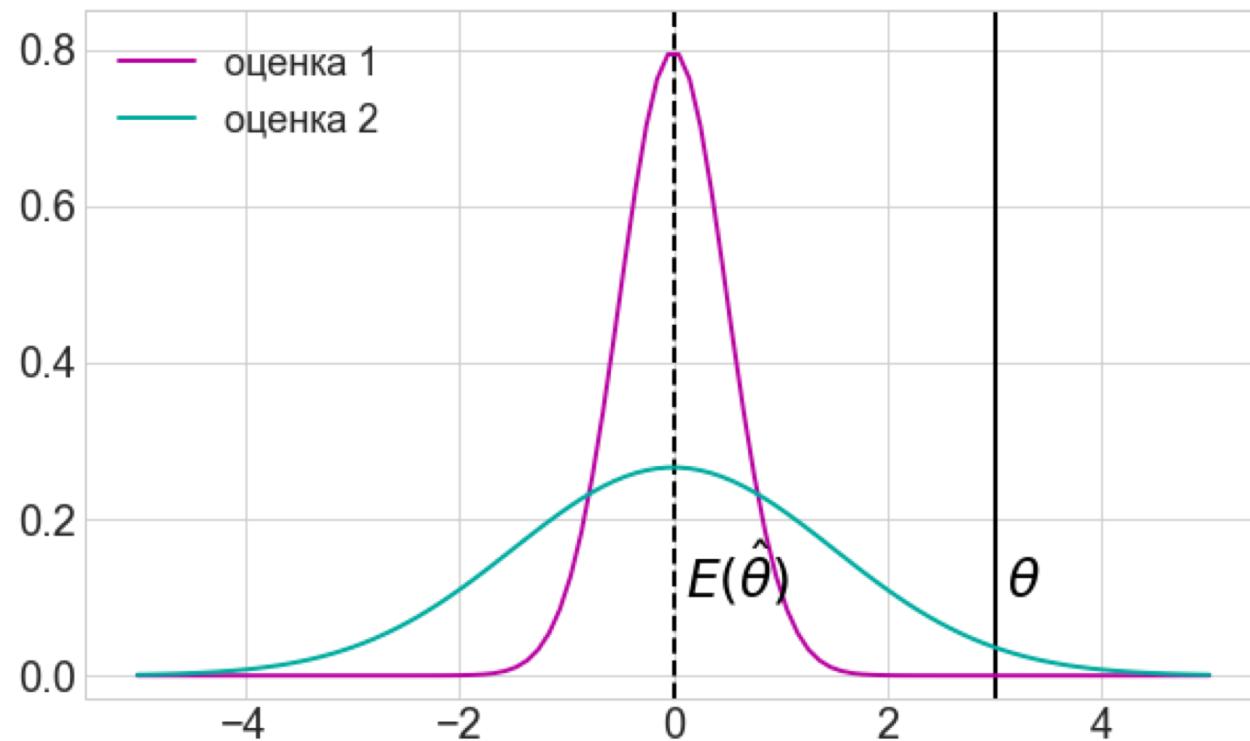
У оценок одинаковое смещение (класс), но при этом у оценки 1 дисперсия меньше



Эффективность

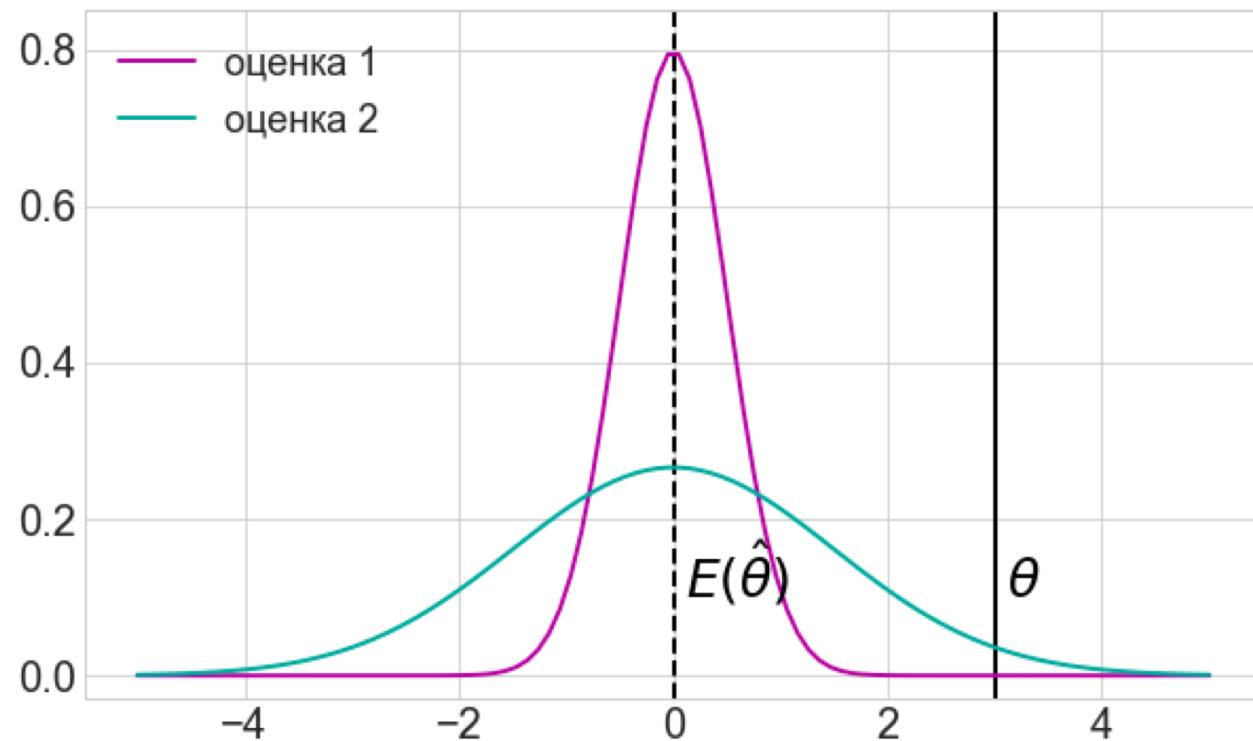
У оценок одинаковое смещение (класс), но при этом у оценки 1 дисперсия меньше

Если у оценки 1 самая маленькая дисперсия из всех существующих \Rightarrow она для нас самая предпочтительная



Эффективность

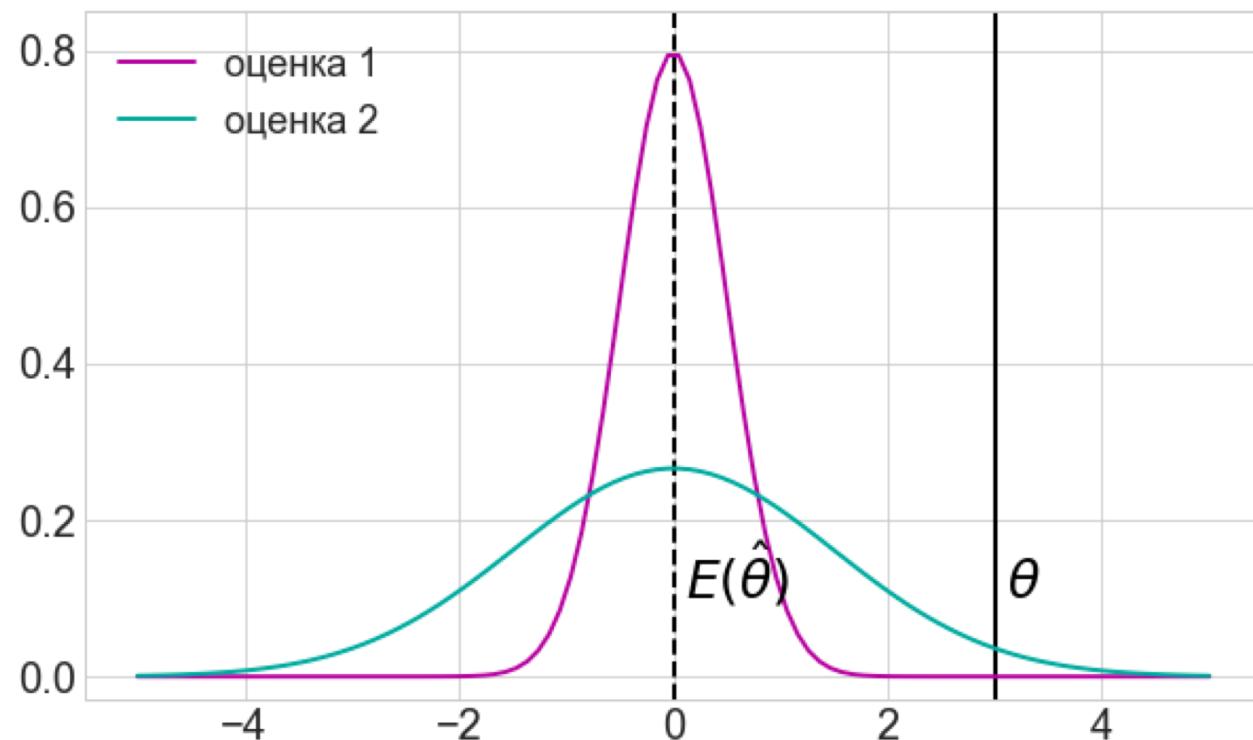
То есть оценка 1 эффективная в классе с таким смещением



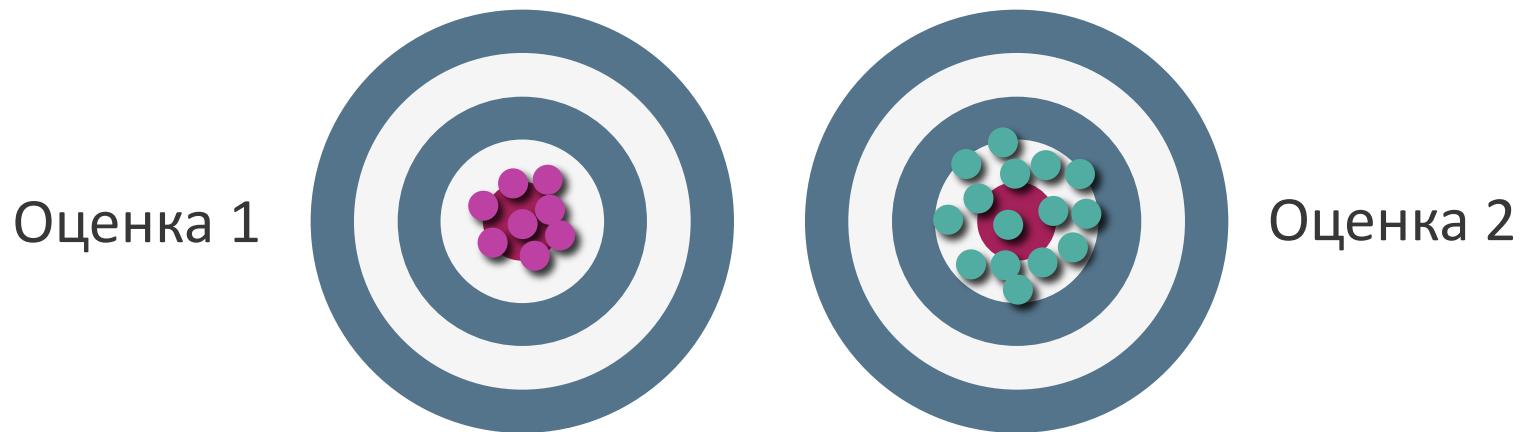
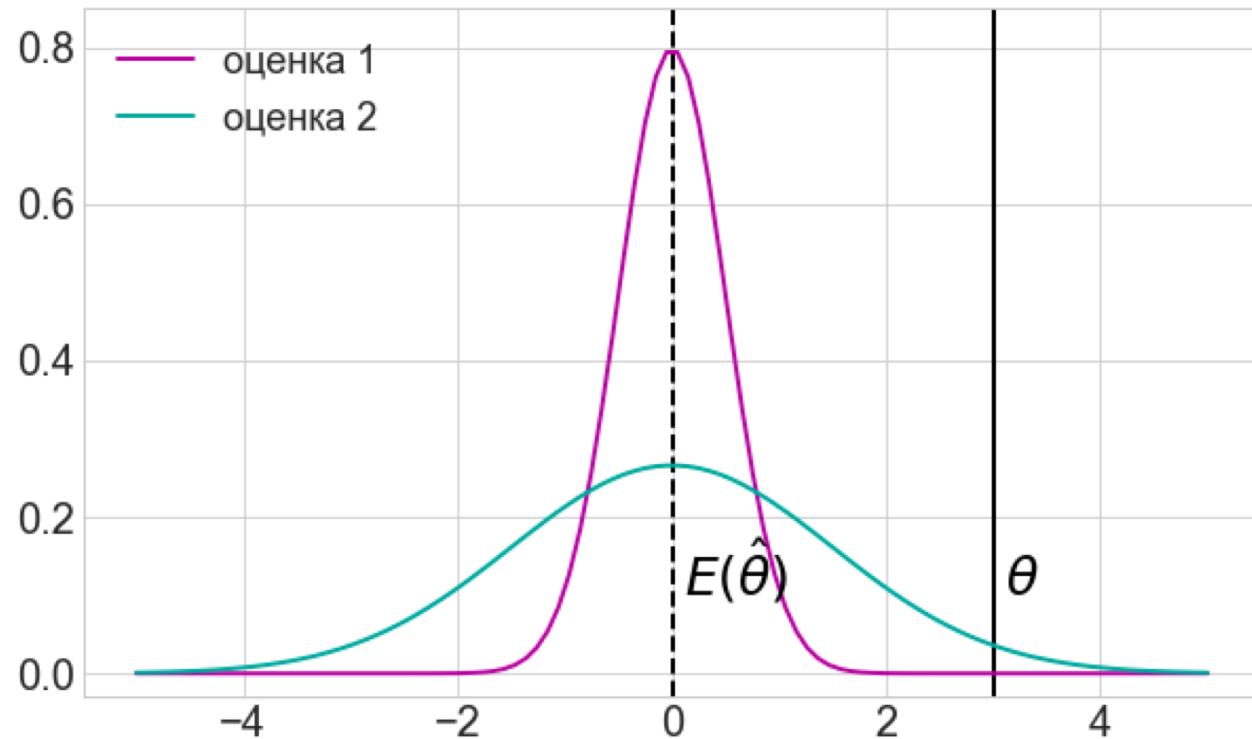
Эффективность

То есть оценка 1 эффективная в классе с таким смещением

Нас будут интересовать несмешённые эффективные оценки



Эффективность



Неравенство Рао-Фреше-Крамера

Для функции потерь MSE существует теоретическая нижняя граница, её называют неравенством Рао Фреше Крамера

Неравенство Рао-Фреше-Крамера

Если оценка параметра несмещена и выполнены условия регулярности:

Неравенство Рао-Фреше-Крамера

Если оценка параметра несмещена и выполнены условия регулярности:

1. Область определения случайной величины не зависит от параметра θ

Неравенство Рао-Фреше-Крамера

Если оценка параметра несмещена и выполнены условия регулярности:

1. Область определения случайной величины не зависит от параметра θ
2. Сложное техническое условие, разрешающее брать производные (обычно формулируется по-разному)

Неравенство Рао-Фреше-Крамера

Если оценка параметра несмещена и выполнены условия регулярности:

1. Область определения случайной величины не зависит от параметра θ
2. Сложное техническое условие, разрешающее брать производные (обычно формулируется по-разному)
3. Существует конечная положительная информация Фишера

$$J(\theta) = \mathbb{E} \left(\frac{\partial \ln f(x, \theta)}{\partial \theta} \right)^2$$

Неравенство Рао-Фреше-Крамера

Если оценка параметра несмещена и выполнены условия регулярности:

1. Область определения случайной величины не зависит от параметра θ
2. Сложное техническое условие, разрешающее брать производные (обычно формулируется по-разному)
3. Существует конечная положительная информация Фишера

$$J(\theta) = \mathbb{E} \left(\frac{\partial \ln f(x, \theta)}{\partial \theta} \right)^2$$

$f(x, \theta)$ – плотность распределения для непрерывных случайных величин и вероятность для дискретных

Неравенство Рао-Фреше-Крамера

Тогда для дисперсии оценки выполняется неравенство Рао Фреше Крамера:

$$Var(\hat{\theta}) \geq \frac{1}{n \cdot J(\theta)}$$

Неравенство Рао-Фреше-Крамера

Тогда для дисперсии оценки выполняется неравенство Рао Фреше Крамера:

$$Var(\hat{\theta}) \geq \frac{1}{n \cdot J(\theta)}$$

Если оказалось, что $Var(\hat{\theta}) = \frac{1}{n \cdot J(\theta)}$, тогда оценка эффективна

Неравенство Рао-Фреше-Крамера

Тогда для дисперсии оценки выполняется неравенство Рао Фреше Крамера:

$$Var(\hat{\theta}) \geq \frac{1}{n \cdot J(\theta)}$$

Если оказалось, что $Var(\hat{\theta}) = \frac{1}{n \cdot J(\theta)}$, тогда оценка эффективна

Точно такое же неравенство можно выписать для смещённых оценок:

$$Var(\hat{\theta}) \geq \frac{(1 + bias'_\theta)^2}{n \cdot J(\theta)}$$

Резюме

Резюме

Несмешённость – много раз используя оценку, при фиксированном размере выборки, в среднем, мы не ошибаемся

Резюме

Несмешённость – много раз используя оценку, при фиксированном размере выборки, в среднем, мы не ошибаемся

Как проверить:

По-честному найти $E(\hat{\theta})$ и сравнить его с θ

Резюме

Состоятельность – последовательность оценок при увеличении числа наблюдений сходится к истинному значению параметра

Резюме

Состоятельность – последовательность оценок при увеличении числа наблюдений сходится к истинному значению параметра

Как проверить:

- используя ЗБЧ найти к чему сходится оценка
- использовать условие Чебышёва:

Резюме

Состоятельность – последовательность оценок при увеличении числа наблюдений сходится к истинному значению параметра

Как проверить:

- используя ЗБЧ найти к чему сходится оценка
- использовать условие Чебышёва:

Если оценка несмешённая и её дисперсия при росте n стремится к нулю \Rightarrow она состоятельная:

$$\mathbb{E}(\bar{x}) = \mu$$
$$Var(\bar{x}) = \frac{\sigma^2}{n} \rightarrow 0 \text{ при } n \rightarrow \infty$$

Резюме

Оценки можно сравнивать между собой с помощью различных функций потерь, обычно используют MSE :

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta})$$

Резюме

Оценки можно сравнивать между собой с помощью различных функций потерь, обычно используют MSE :

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta})$$

Поиск компромисса между смещением и разбросом позволяет уменьшить MSE , этим часто пользуются в машинном обучении (**регуляризация**)

Резюме

Оценки можно сравнивать между собой с помощью различных функций потерь, обычно используют MSE :

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta})$$

Поиск компромисса между смещением и разбросом позволяет уменьшить MSE , этим часто пользуются в машинном обучении (**регуляризация**)

В классе всех возможных оценок наилучшей в смысле MSE оценки не существует

Резюме

Оценки можно сравнивать между собой с помощью различных функций потерь, обычно используют MSE :

$$MSE = \mathbb{E}(\hat{\theta} - \theta)^2 = Var(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta})$$

Поиск компромисса между смещением и разбросом позволяет уменьшить MSE , этим часто пользуются в машинном обучении (**регуляризация**)

В классе всех возможных оценок наилучшей в смысле MSE оценки не существует

Обычно нас интересуют несмешённые оценки

Резюме

Эффективность – хотим самый узкий доверительный
интервал \Rightarrow ищем оценку с самой маленькой дисперсией в
каком-то классе

Резюме

Эффективность – хотим самый узкий доверительный интервал \Rightarrow ищем оценку с самой маленькой дисперсией в каком-то классе

Как проверить:

- иногда помогает неравенство Рао-Фреше-Крамера

Резюме

Эффективность – хотим самый узкий доверительный интервал \Rightarrow ищем оценку с самой маленькой дисперсией в каком-то классе

Как проверить:

- иногда помогает неравенство Рао-Фреше-Крамера

$$Var(\hat{\theta}) \geq \frac{1}{n \cdot J(\theta)}$$

Если мы получили равенство, оценка эффективна.

Если нет, мы не можем сказать про неё ничего конкретного,
и нужна более мощная процедура
для проверки