

## СЕМ, лекция 3

(2020-10-15)

$$\Omega = \{1, 2, \dots, N\}, p_i = \frac{1}{N}.$$

Равномерна вероятност е такава вероятност, при която всяко едно от събитията е с равна вероятност да се сбъдне. Тя е прототип на случая, в който нямаме никаква априорна информация за модела и не искаме на нито един от възможните изходи да придаваме по-голяма или по-малка възможност за сбъждане от тези на останалите.

$$\Omega = \{w_1, w_2, \dots, w_m, \dots\}$$

Когато имаме изброимо много елементи (събития) също имаме дискретна вероятност и множество от числа (вероятности), които вървят с всяко едно събитие

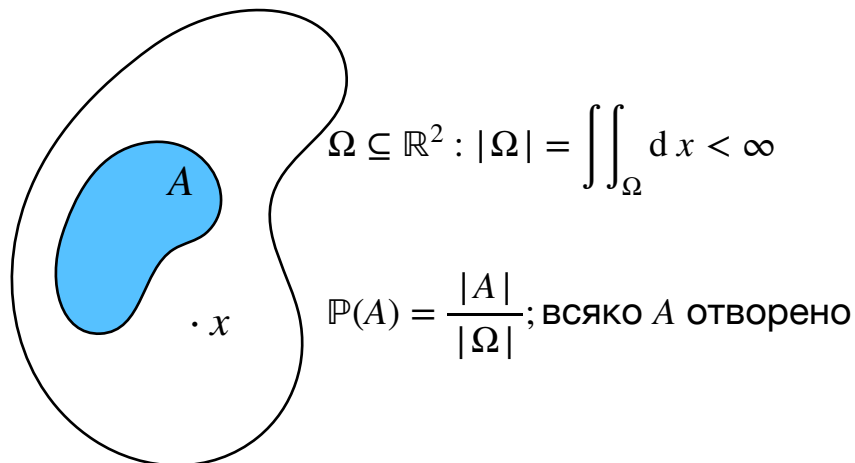
$\{p_1, p_2, \dots, p_n, \dots\}, p_i \geq 0, \sum_{i=1}^{\infty} p_i = 1$ . В този случай, обаче, не е възможно да зададем равномерна вероятност.

$$\mathbb{P}(\{w_i\}) = p_i, i \geq 1;$$

$$A \subseteq \Omega, \mathbb{P}(A) = \sum_{w_i \in A} p_i.$$

### Геометрична вероятност

Тази вероятност е пример за вероятностно разпределение върху неизброимо множество. Най-простия прототип, който ще вземем, отново отговаря на равномерна вероятност.



Вероятността нещо да се случи в  $A$ , като подмножество на  $\Omega$  ( $A \subseteq \Omega$ ) е равна на площта (мярката) на  $A$  върху площта на  $\Omega$   $\left(\frac{\mu(A)}{\mu(\Omega)}\right)$ . Това е пример за равномерна вероятност, но равномерна само върху  $\Omega$ . Това е така, защото самата вероятност

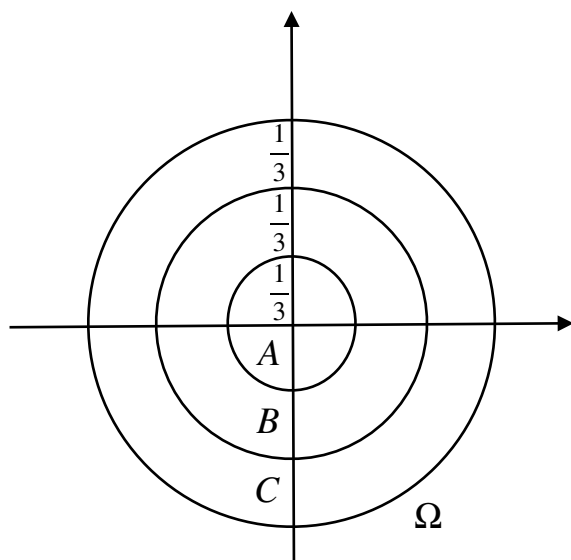
зависи само от площта на (събитието)  $A$  – не зависи от нейната локация или форма, а само от нейната площ.

$$\mathbb{P}(\{x\}) = \frac{|\{x\}|}{|\Omega|} = 0. \text{ Площта на една точка е равна на } 0. \text{ Вероятността на една}$$

точка е равна на 0 (има безбройно много други точки от каквато и да е площ).

Вероятността да оценим конкретна точка е равна на 0 (площта и е нулева).

⊕



$$\Omega = \{x^2 + y^2 \leq 1\}$$

$$A = \{x^2 + y^2 \leq \frac{1}{9}\}$$

$$B = \{\frac{1}{9} \leq x^2 + y^2 \leq \frac{4}{9}\}$$

$$C = \{\frac{4}{9} \leq x^2 + y^2 \leq 1\}$$

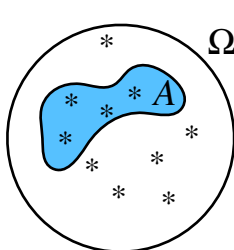
Ако се стреля хаотично (напълно аматьорски), то вероятностите да се улучат съответно множествата  $A$ ,  $B$  и  $C$  са съответно:

$$A : \quad \mathbb{P}(A) = \frac{\mu(A)}{\mu(\Omega)} = \frac{\pi \times \left(\frac{1}{3}\right)^2}{\pi \times 1^2} = \frac{1}{9};$$

$$B : \quad \mathbb{P}(B) = \frac{\mu(A \cup B) - \mu(A)}{\mu(\Omega)} = \frac{\pi \times \left(\frac{2}{3}\right)^2 - \pi \left(\frac{1}{3}\right)^2}{\pi \times 1^2} = \frac{4}{9} - \frac{1}{9} = \frac{3}{9} = \frac{1}{3};$$

$$C : \quad \mathbb{P}(C) = \frac{\mu(A \cup B \cup C) - \mu(A \cup B)}{\mu(\Omega)} = \frac{\pi \times 1^2 - \pi \times \left(\frac{2}{3}\right)^2}{\pi \times 1^2} = 1 - \frac{4}{9} = \frac{5}{9}.$$

Идея на Монте Карло алгоритмите: Имаме, например, лицето на  $\Omega$ , което в нашия случай е кръг и искаме да пресметнем лицето на  $A \subseteq \Omega$ :



$$\frac{A(N)}{N}$$

брой на точките попаднали в  $A$   
брой на всички хвърлени точки

Колкото повече точки включваме в изследването, толкова по-добро ще е приближението към шлоцта на  $A$ . По този начин реално може да пресметнем интеграл без числени методи.

**Дефиниция: (Вероятностно пространство)** Наредена тройка  $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ , където  $\Omega$  е пространство от елементарни събития;

$\mathcal{A}$

$\subseteq 2^\Omega$  е  $\sigma$ -алгебра и

колекция от

подмножества на  $\Omega$

$\mathbb{P} : \mathcal{A} \rightarrow [0,1]$  е вероятностна мярка (вероятното пространство).

$$\oplus \quad \Omega = \{1, 2, \dots, N\}; \mathcal{A} = 2^\Omega$$

$$\mathbb{P}(\{i\}) = \frac{1}{N}, \forall i \geq 1$$

В случая когато сме взели вероятностите на всяко елементарно събитие да са равни – ще имаме равномерно вероятностно пространство. Т.е. всяко  $i \geq 0$  има един и същ шанс да се сбъдне/падне.

$$\oplus \quad \Omega = \{x^2 + y^2 \leq 1\}; A, B, C; \mathcal{A} = \{\emptyset, \Omega, A, B, C, A \cup B, B \cup C, C \cup A\}$$

$$\mathbb{P}(\emptyset) = 0, \mathbb{P}(\Omega) = 1, \mathbb{P}(A) = \frac{1}{9}, \mathbb{P}(B) = \frac{3}{9}, \mathbb{P}(C) = \frac{5}{9}, \mathbb{P}(A \cup B) = \frac{4}{9},$$

$$\mathbb{P}(B \cup C) = \frac{8}{9}, \mathbb{P}(C \cup A) = \frac{6}{9}.$$

$$\oplus \quad \Omega = \{x^2 + y^2 \leq 1\}; \underbrace{\mathcal{B}(\Omega)}_{\text{бореловата сигма алгебра}} = \mathcal{A} : \mathbb{P}(A) = \frac{|A|}{|\Omega|}; \quad \forall A \in \mathcal{A}.$$

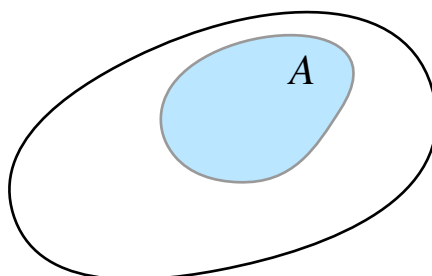
бореловата  
сигма алгебра

## Условна вероятност

$(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ . Нашият модел трябва да е такъв, че да може да промени вероятностното пространство максимално добре спрямо постъпваща информация.

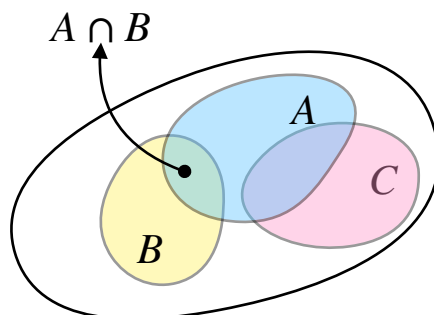
Изкуственият интелект, бейсовата статистика и много други имат зад себе си условни вероятности освен всичко останало, което включват.

$A \in \mathcal{A}$  настъпва. Първоначално тръгваме с  $\Omega$ , но в даден етап настъпва събитието  $A$ . Това вече е в състояние да промени цялото вероятностно пространство/разпределение. Въпроса е как това се случва (как се променя)?



**Дефиниция: (Условна вероятност)** Нека  $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$  е вероятностно пространство и е такава, че  $A \in \mathcal{A} : \mathbb{P}(A) > 0$ . Тогава условна вероятност при условие  $A$  наричаме  $\mathbb{P}_A(B) = \mathbb{P}(B|A) = \frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}(A)}, \forall B \in \mathcal{A}$ .

По този начин се изчисляват вероятностите на всяко едно  $B$ .



Т.е. ние знаем, че е настъпило събитието  $A$  и тази част от  $B$ , която не е в  $A$  – не ни интересува! Трябва да пресмятаме вероятността да се сбъдне частта на  $B$ , която попада в  $A$  ( $A \cap B$ ), като новото вероятностно състояние вече е  $A$  ( $\Omega \mapsto A$ ). Т.е. ние вече „живеем“ в  $(A, \mathcal{A} \cap A, \mathbb{P}_A)$ .

При настъпването на  $A$  се променя вероятностното пространство.  
 $A \cap \mathcal{A} = \{B \cap A | B \in \mathcal{A}\}$ .

Най-доброто число, което бихме задали за вероятност на събитието  $B$ , при положение, че знаем (че се е случило)  $A$  е  $\frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}(A)}$ , както интуитивно, така и чисто в математически смисъл.

⊕ „6 от 49“

Пуснали сме фиш:  $B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ . По една или друга причина ние научаваме, че са се паднали числата 1 и 2 в настоящия тираж (някога когато не е имало интернет). Т.е.  $A = \{ \underbrace{w}_{\text{шесторки}} \in \Omega | 1 \text{ и } 2 \in w \}$ .

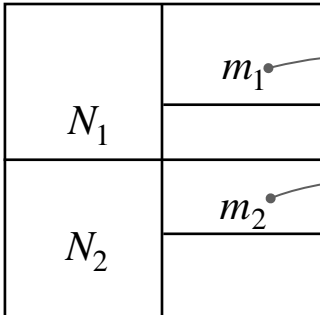
шесторки

$$\mathbb{P}(B|A) = \frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}(A)} = \frac{\mathbb{P}(B)}{\mathbb{P}(A)}, \text{ тъй като } B \subseteq A. \text{ Следователно}$$

$$\mathbb{P}(B|A) = \frac{\mathbb{P}(B)}{\mathbb{P}(A)} = \frac{\frac{1}{\binom{49}{6}}}{\frac{1}{\binom{47}{4}}} = \frac{1}{13\,983\,816} \cdot \frac{1}{\frac{1}{128\,365} \binom{47}{4}} = \frac{1}{178\,365}. \text{ Т.е. вероятността за}$$

печалба нараства значително (от порядъка на 70 – 80 пъти).

⊕ Имаме две партии на някакви избори -  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ .

партия 1	$N_1$	$m_1$	
партия 2	$N_2$	$m_2$	

Пита се някакъв човек – за коя партия е гласувал и той се окачва, че е млад. Нека  $A = \{\text{млад}\}$  и  $B = \{\text{гласувал за } \Pi_1\}$ . Сега питаме – каква е вероятността да е гласувал за  $\Pi_1$ , ако се знае, че е млад?

$$\mathbb{P}(B|A) = \frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}(A)} = \frac{\frac{m_1}{N_1 + N_2}}{\frac{m_1 + m_2}{N_1 + N_2}} = \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \text{ т.е. числото така се променя, че не}$$

зависи от общия брой гласоподаватели, а само от младите такива ( $m_1$  и  $m_2$ ).

## Независимост

**Дефиниция: (Независимост)** Две събития  $A$  и  $B$  се наричат независими, ако  $\mathbb{P}(A \cap B) = \mathbb{P}(A) \times \mathbb{P}(B)$  (Ако  $\mathbb{P}(A) > 0 \Rightarrow \mathbb{P}(B|A) = \mathbb{P}(B)$ , т.е. независимостта означава, че случването на събитието  $A$  не ни носи никаква информация за  $B$ ).

**Дефиниция: (Взаимна независимост)** Дадени са събития  $A_1, A_2, \dots, A_n$ . Казваме, че те са независими взаимно (в съвкупност), ако

$$\forall M \in \{1, \dots, n\} \ (M \neq \emptyset, M \text{ не е празното}) \quad \mathbb{P}\left(\bigcap_{i \in M} A_i\right) = \prod_{i \in M} \mathbb{P}(A_i).$$

Вероятността да се случи кое да е подмножество от  $M$  се разпада на произведението на вероятностите да се случат съставните (елементарните) множества от  $M$ .

**Теорема:** Нека  $A_1, A_2, \dots, A_n$  са  $n$  събития, така че  $\mathbb{P}\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) > 0$ . Тогава

$$(*) \mathbb{P}\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = \mathbb{P}\left(A_n \mid \bigcap_{i=1}^{n-1} A_i\right) \times \mathbb{P}\left(A_{n-1} \mid \bigcap_{i=1}^{n-2} A_i\right) \times \dots \times \mathbb{P}(A_2 | A_1) \times \mathbb{P}(A_1)$$

Доказателство: По индукция. За  $n = 1$  :  $\mathbb{P}(A_1) = \mathbb{P}(A_1)$ . Нека допуснем, че  $(*)$  е вярно за  $n = k$ , т.е. :  $\mathbb{P}\left(\bigcap_{i=1}^k A_i\right) = \mathbb{P}\left(A_k \mid \bigcap_{i=1}^{k-1} A_i\right) \times \dots \times \mathbb{P}(A_2 \mid A_1) \mathbb{P}(A_1)$

(Индукционна хипотеза). Ще докажем верността на твърдението и за  $n = k + 1$  (Индукционна стъпка):

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{i=1}^{k+1} A_i\right) = \mathbb{P}\left(A_{k+1} \cap \bigcap_{i=1}^k A_i\right) = \mathbb{P}\left(A_{k+1} \mid \bigcap_{i=1}^k A_i\right) \mathbb{P}\left(\bigcap_{i=1}^k A_i\right)$$

Следствие: Ако  $A_1, A_2, \dots, A_n$  са независими (ще разбирате, че са взаимно независими / зависими в съвкупност), то  $\mathbb{P}\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n \mathbb{P}(A_i)$ .

⊕ „6 от 49“

$$\Omega = \{w = (w_1^{(1)}, w_2^{(2)}, \dots, w_{10\,001}^{(10\,001)})\}$$

всички паднали се 10 001  
наредени шесторки до сега

$$A = \bigcup_{i=1}^{10\,000} A_i, A_i = \{w \in \Omega \mid w^{(i)} = w^{(i+1)}\}$$

$$\mathbb{P}(A) = \mathbb{P}\left(\bigcup_{i=1}^{10\,000} A_i\right) = 1 - \mathbb{P}\left(\overline{\bigcup_{i=1}^{10\,000} A_i}\right) = 1 - \mathbb{P}\left(\bigcap_{i=1}^{10\,000} \bar{A}_i\right) = 1 - \prod_{i=1}^{10\,000} \mathbb{P}(\bar{A}_i).$$

$\bar{A}_i$  са независими, тъй като ако  $\bar{A}_i = \{w \in \Omega \mid w^{(i)} \neq w^{(i+1)}\}$  и

$\bar{A}_j = \{w \in \Omega \mid w^{(j)} \neq w^{(j+1)}\}$ , то за  $|i - j| \geq 2$ ,  $\bar{A}_i$  и  $\bar{A}_j$  са независими. Освен това може да се покаже, че  $A_i$  и  $A_{i+1}$  също са независими.

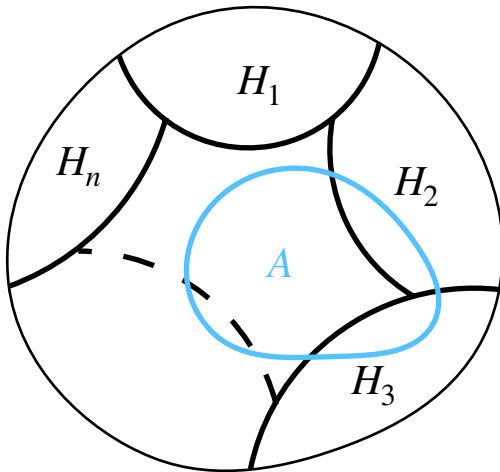
$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\bar{A}_i \cap \bar{A}_{i+1}) &= \mathbb{P}(\bar{A}_i) \times \mathbb{P}(\bar{A}_{i+1}) = 1 = \prod_{i=1}^{10\,000} \mathbb{P}(\bar{A}_i) = 1 - (\mathbb{P}(\bar{A}_1))^{10\,000} = \\ &= 1 - \left(\frac{\binom{49}{6} - 1}{\binom{49}{6}}\right)^{10\,000} = 1 - \left(1 - \frac{1}{\binom{49}{6}}\right)^{10\,000} \approx 1 - \left(1 - 10\,000 \times \frac{1}{\binom{49}{6}}\right) \approx \frac{1}{1400} \end{aligned}$$

## Формула за пълната вероятност

**Дефиниция: (Пълна група от събития)**  $H_1, H_2, \dots, H_n$  се нарича пълна група от събития, ако  $H_i \cap H_j = \emptyset, \forall i \neq j, i \leq n, j \leq n$  и  $\bigcup_{i=1}^n H_i = \Omega$ . ( $\bigcup$  е символ за обединение на непресичащи се множества).

**Теорема: (Формула за пълната вероятност)** Нека  $H_1, H_2, \dots, H_n$  е пълна група от събития в  $\Omega$  и  $A \in \mathcal{A}$ . Тогава  $\mathbb{P}(A) = \sum_{i=1}^n \mathbb{P}(A | H_i) \mathbb{P}(H_i)$  с конвенцията, че ако  $\mathbb{P}(H_i) = 0$ , то  $\mathbb{P}(A | H_i) \mathbb{P}(H_i) = 0$ .

**Доказателство:**  $A = A \cap \Omega = A \cap \bigcup_{i=1}^n H_i = \bigcup_{i=1}^n A \cap H_i$ .



Тогава

$$\mathbb{P}(A) = \mathbb{P}\left(\bigcup_{i=1}^n A \cap H_i\right) \stackrel{\text{непресичащи се}}{=} \sum_{i=1}^n \mathbb{P}(A \cap H_i)$$

$$\sum_{i=1}^n \mathbb{P}(A \cap H_i) = \sum_{i=1}^n \mathbb{P}(A | H_i) \mathbb{P}(H_i),$$

като накрая използвахме, че

$\mathbb{P}(A \cap B) = \mathbb{P}(B | A) \mathbb{P}(A)$ , което е формулата за условна вероятност.

**Теорема: (Формула на Бейс)** Нека  $H_1, H_2, \dots, H_n$  е пълна група от събития в  $\Omega$  и

$$A \in \Omega. \text{ Тогава } \mathbb{P}(H_k | A) = \frac{\mathbb{P}(A | H_k) \mathbb{P}(H_k)}{\mathbb{P}(A)} = \frac{\mathbb{P}(A | H_k) \mathbb{P}(H_k)}{\sum_{i=1}^n \mathbb{P}(A | H_i) \mathbb{P}(H_i)}, \forall 1 \leq k \leq n.$$

**Доказателство:** От една страна имаме, че  $\mathbb{P}(A \cap H_k) = \mathbb{P}(A | H_k) \mathbb{P}(H_k)$ , но от друга страна  $\mathbb{P}(H_k | A) \mathbb{P}(A) = \mathbb{P}(H_k \cap A)$

$$\Rightarrow \mathbb{P}(H_k | A) = \frac{\mathbb{P}(H_k) \mathbb{P}(A | H_k)}{\mathbb{P}(A)}.$$

Формулата на Бейс показва как  
формула за  
пълната вероятност

актуализираме нашата априорна вероятност за хипотеза да се случи, при положение че е настъпила някаква информация  $A$ .

⊕ Допускаме, че на някакво летище има бърз COVID-19 тест, който е способен да индикира дали даден човек е заразен или не. Инфектираните са 1 % от посетителите на летището.

$I$  (*infected*)  $\longrightarrow$  99 % . Ако човек **е** носител на висруса, теста с 99 % засича вярно и индикира, за наличието на вирус.

$H$  (*healthy*)  $\longrightarrow$  80 % . Ако човек **не е** носител на заразата, тогава теста правилно връща индикатор (т.е. не реагира) с 80 % вероятност, че е здрав.

Да се пресметне вероятността, даден човек да е заразен, при положение, че теста е реагирал положително за наличие на вирус?

Решение:

Нека  $A = \{ \text{теста е реагирал положително за вирус (аларма)} \}$ .

Търси се  $\mathbb{P}(I|A)$ .

$$\begin{aligned}\mathbb{P}(I|A) &= \frac{\mathbb{P}(I \cap A)}{\mathbb{P}(A)} = \frac{\mathbb{P}(A|I)\mathbb{P}(I)}{\mathbb{P}(A|I)\mathbb{P}(I) + \mathbb{P}(A|H)\mathbb{P}(H)} = \frac{99\% \times 1\%}{99\% \times 1\% + 20\% \times 99\%} = \\ &= \frac{99}{99 + 20 \times 99} = \frac{1}{21} .\end{aligned}$$

Тук излолзвахме, че  $I$  и  $H$  са пълна група от събития, тъй

като  $I = \bar{H}$ .

Оказва се, че теста не е много полезен. Получава се така, защото заразените са много малък процент от популацията (посетителите на летището), а грешката от 20 % е втърде голяма.

⊕  $p \ll 10\%$  заразени.

Взимат се няколко проби и се смесват и се тества смеската. По този начин с един тест се правят  $n$  проби (където  $n$  е броя на извадката).

$n$  – проби накуп =  $\begin{cases} \text{нито един заразен - жертваме 1 тест, но правим извод за цялата извадка;} \\ \text{има заразен, тогава правим } n \text{ индивидуални теста.} \end{cases}$

Как да подберем размера на извадката  $n$ , така че да минимизираме използваните тестове.

Например при  $p = 5\% = 0,05$ ,  $p = 2\% = 0,02$ . Да се помисли за домашно (случайни величини – предстои да се вземат).



⊕ Имаме две числа  $a$  и  $b$  (две суми пари в два плика), за които ние не знаем нищо, освен че са положителни  $a, b > 0$ , но някой друг (водеция на играта, например) знае, че  $a < b$ .

Може ли да измислим стратегия, при която  $\mathbb{P}(b) > \frac{1}{2}$  (избираме по-голямата сума с вероятност по-голяма от 50 %)?

Решение:

Нека  $A = \{\text{вижда } a \text{ в } I^{\text{ви}} \text{ плик}\}$  и  $B = \{\text{вижда } b \text{ във } II^{\text{ви}} \text{ плик}\}$ .

Знаем, че  $\mathbb{P}(A) = \mathbb{P}(B) = \frac{1}{2}$ . Нека още  $C = \{\text{прави се смяна на пликовете}\}$ .

$$\begin{aligned}\mathbb{P}(b) &= \mathbb{P}(A \cap C) + \mathbb{P}(B \cap \bar{C}) = \mathbb{P}(C|A)\mathbb{P}(A) + \mathbb{P}(\bar{C}|B)\mathbb{P}(B) = \\ &= \frac{1}{2} (\mathbb{P}(C|A) + \mathbb{P}(\bar{C}|B)) = \frac{1}{2} (\mathbb{P}(C|A) + 1 - \mathbb{P}(C|B)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} (\mathbb{P}(C|A) - \mathbb{P}(C|B))\end{aligned}$$

$$\text{Тук използвахме, че } \mathbb{P}(C|B) + \mathbb{P}(\bar{C}|B) = \frac{\mathbb{P}(C \cap B) + \mathbb{P}(\bar{C} \cap B)}{\mathbb{P}(B)} = 1.$$

Т.е. задачата се свежда до въпроса: може ли да определим такава стратегия, при която  $\mathbb{P}(C|A) > \mathbb{P}(C|B)$ .

Нека разгледаме няколко случая, за да добием представа за сложността на въпроса:

Нека

$$J = \mathbb{P}(C|A) - \mathbb{P}(C|B) \Rightarrow J = \mathbb{P}(C) \times (\mathbb{P}(A|C) - \mathbb{P}(B|C)) = \mathbb{P}(C) \times (\mathbb{P}(B) - \mathbb{P}(A))$$

1 сл. Ако никога не сменяме, т.е.  $\mathbb{P}(C) = 0 \rightarrow J = 0$ ;

2 сл. Ако сменяме на всяко второ теглене, т.е.  $\mathbb{P}(C) = \frac{1}{2} \rightarrow J = 0$ ;

3 сл. Ако винаги сменяме, т.е.  $\mathbb{P}(C) = 1 \rightarrow J = 0$ .

Обаче, ако си дефинираме стратегията по следния начин: ако виждаме числото  $x$  сменяме с вероятност  $e^{-x}$ . Т.е.  $\mathbb{P}(C|\text{виждаме } x) = e^{-x} \Rightarrow J = e^{-a} - e^{-b} > 0$ .