

Методы оптимизации. Семинар 5. Выпуклые множества.

Корнилов Никита Максимович

Московский физико-технический институт

2 октября 2025г

Definition

Множество $S \subset \mathbb{R}^n$ называется *выпуклым*, если для любых двух точек $x_1, x_2 \in S$ и любого числа $\theta \in [0, 1]$, точка $\theta x_1 + (1 - \theta)x_2$ также принадлежит S .

Если мы берем любые две точки внутри множества и соединяем их отрезком, то весь этот отрезок лежит внутри множества.

Примеры выпуклых множеств

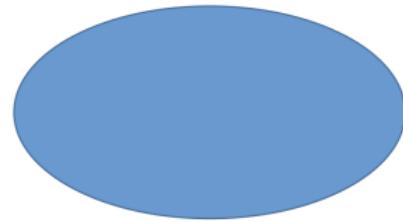


Рис.: Пример выпуклого множества.



Рис.: Пример не выпуклого множества.

Афинные множества

Definition

Множество $S \subset \mathbb{R}^n$ называется *аффинным*, если для любых двух точек $x_1, x_2 \in S$ и любого числа $\theta \in \mathbb{R}$, точка $\theta x_1 + (1 - \theta)x_2$ также принадлежит S .

Proposition

Любое аффинное множество является выпуклым.

В аффинном множестве, выбрав две точки, мы ожидаем, что не только отрезок между ними, но и вся прямая, соединяющая эти точки, принадлежит этому множеству, в отличие от определения выпуклости.

Докажем по определению

Example (Полуплоскость)

Пусть $a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$, $b \in \mathbb{R}$, тогда полуплоскость $\{x \mid a^T x \geq b\}$ выпукла.

Example (Гиперплоскость)

Пусть $a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$, $b \in \mathbb{R}$, тогда гиперплоскость $\{x \mid a^T x = b\}$ афинное множество.

Example (Шар по норме)

Пусть $\|\cdot\|$ — норма в \mathbb{R}^n , $r > 0$ и $c \in \mathbb{R}^n$. Тогда шар $\overline{B}(c, r) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - c\| \leq r\}$ является выпуклым множеством.

В частности, шары в матричных нормах $\|A\|_F = \sqrt{\text{Tr}(A^T A)}$ (норма Фробениуса) и $\|A\|_2 = \max_{\|x\|_2=1} \|Ax\|_2$ (Спектральная норма) также являются выпуклыми.

Example (Сфера)

Пусть $\|\cdot\|$ — норма в \mathbb{R}^n , $r > 0$ и $c \in \mathbb{R}^n$. Является ли сфера $S = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - c\| = r\}$ выпуклым множеством?

Докажем по определению

Example (Множество положительно полуопределеных матриц)

Множество всех положительно полуопределенных матриц размера $n \times n$, определяемое как

$$\mathcal{S}_+^n = \{X \in \mathbb{R}^{n \times n} \mid X = X^T, z^T X z \geq 0, \forall z \in \mathbb{R}^n\},$$

является выпуклым множеством. Аналогично, множество положительно определенных матриц \mathcal{S}_{++}^n тоже выпуклое.

Example

Является ли множество $M = \{x \in \mathbb{R}_{++}^2 \mid x_1 x_2 \geq 1\}$ выпуклым?

Афинная функция

Definition

Функция $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ называется *афинной*, если найдутся $b \in \mathbb{R}^m$ и $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ такие, что $f(x) = Ax + b$.

Операции, сохраняющие выпуклость

Операции, сохраняющие выпуклость:

- ① **Пересечение:** Пусть $\{S_i\}_{i \in I}$ - семейство выпуклых множеств, тогда пересечение $\cap_{i \in I} S_i$ также является выпуклым.
- ② **Линейная комбинация:** Пусть S_1, S_2 — выпуклые множества и $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$, тогда линейная комбинация $c_1 S_1 + c_2 S_2 = \{c_1 x_1 + c_2 x_2 | x_1 \in S_1, x_2 \in S_2\}$ также является выпуклым множеством.

Операции, сохраняющие выпуклость

Операции, сохраняющие выпуклость:

- ① **Пересечение:** Пусть $\{S_i\}_{i \in I}$ — семейство выпуклых множеств, тогда пересечение $\bigcap_{i \in I} S_i$ также является выпуклым.
- ② **Линейная комбинация:** Пусть S_1, S_2 — выпуклые множества и $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$, тогда линейная комбинация $c_1 S_1 + c_2 S_2 = \{c_1 x_1 + c_2 x_2 \mid x_1 \in S_1, x_2 \in S_2\}$ также является выпуклым множеством.
- ③ **Взятие образа при афинном преобразовании:** Пусть S — выпуклое множество, f — афинная функция, тогда $f(S)$ также является выпуклым множеством.
- ④ **Взятие прообраза при афинном преобразовании:** Пусть S — выпуклое множество, f — афинная функция, тогда $f^{-1}(S)$ также является выпуклым множеством.

Операции, сохраняющие выпуклость

Операции, сохраняющие выпуклость:

- ① **Пересечение:** Пусть $\{S_i\}_{i \in I}$ — семейство выпуклых множеств, тогда пересечение $\bigcap_{i \in I} S_i$ также является выпуклым.
- ② **Линейная комбинация:** Пусть S_1, S_2 — выпуклые множества и $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$, тогда линейная комбинация $c_1 S_1 + c_2 S_2 = \{c_1 x_1 + c_2 x_2 \mid x_1 \in S_1, x_2 \in S_2\}$ также является выпуклым множеством.
- ③ **Взятие образа при афинном преобразовании:** Пусть S — выпуклое множество, f — афинная функция, тогда $f(S)$ также является выпуклым множеством.
- ④ **Взятие прообраза при афинном преобразовании:** Пусть S — выпуклое множество, f — афинная функция, тогда $f^{-1}(S)$ также является выпуклым множеством.
- ⑤ **Декартово произведение:** Пусть S_1, S_2, \dots, S_n — выпуклые множества, тогда декартово произведение $S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$ также выпукло.

Докажем через сохранение выпуклости

Example (Многогранник)

Многогранником называется множество точек в \mathbb{R}^n , задающееся системой линейных равенств и неравенств: $\{x \in \mathbb{R}^n | Ax \leq b, Cx = d\}$, где $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$, $C \in \mathbb{R}^{k \times n}$ и $d \in \mathbb{R}^k$.

Example (Ограниченные полиномы)

Докажите, что множество $\{a \in \mathbb{R}^k | p(0) = 1, |p(t)| \leq 1 \forall t : \alpha \leq t \leq \beta\}$,

где

$p(t) = a_1 + a_2 t + \dots + a_k t^{k-1}$, является выпуклым.

Докажем через афинные функции

Example

Докажите, что множество $S = \{x | \|Ax + b\| \leq c^T x + d\}$, где $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$ и $c, d \in \mathbb{R}^n$, выпукло.

Докажем через афинные функции

Example (Гиперболический конус)

Пусть $P \in \mathcal{S}_+^n$ и $c \in \mathbb{R}^n$, тогда множество

$$K = \{x | x^T P x \leq (c^T x)^2, c^T x \geq 0\}$$

является выпуклым.

Доказательство.

Как мы уже знаем, множество $L = \{(x, t) | \|x\| \leq t\}$ является выпуклым.

Воспользуемся фактом, что $\forall P \in \mathcal{S}_+^n \exists Q \in \mathcal{S}_+^n : P = Q^2$, поэтому наше множество K переписывается следующим образом:

$K = \{x | \|Qx\| \leq c^T x\}$. Заметим, что $K = f^{-1}(L)$, где $f(x) = (Qx, c^T x)$ - афинная функция. Поэтому K выпукла как прообраз выпуклого множества при афинном преобразовании. □

Докажем через афинные функции

Example

Рассмотрим множество $C = \{x \in \mathbb{R}^n | x_1A_1 + x_2A_2 + \dots + x_nA_n \succ B\}$, где $A_1, A_2, \dots, A_n, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Докажите, что C выпукло.

Доказательство.

Рассмотрим афинную функцию $f(x) = x_1A_1 + x_2A_2 + \dots + x_nA_n - B$,
тогда

$C = f^{-1}(S_{++}^n)$. Поэтому C выпукла как прообраз выпуклого
множества.



Конусы

Definition

Множество C называется конусом, если для любых $c \in C$ и $\theta \geq 0$ точка θc также принадлежит C .

Если взять любую точку из конуса, то отрезок по направлению из 0 до этой точки можно сколь угодно продлить в этом конусе.

Примеры: любое линейное подпространство, прямая через начало координат, луч из начала координат.

Proposition

Условие: для любых $c_1, c_2 \in C$, $\theta_1, \theta_2 \geq 0$ выполнено

$$\theta_1 c_1 + \theta_2 c_2 \in C,$$

равносильно тому, что множество является выпуклым конусом.

Свойства конусов

Любой конус обязательно содержит 0.

Proposition

Пересечение любого семейства (выпуклых) конусов сохраняет свойство быть (выпуклым) конусом.

Примеры конусов

Example

Множество $C = \{(x, t) \in R^{n+1} : \|x\| \leq t\}$ является выпуклым конусом.

Example

Множество положительно полуопределенных матриц S_+^n является выпуклым конусом

Example

Гиперплоскости $\{x \mid a^T x = 0\}$ и полуплоскости $\{x \mid a^T x \geq 0\}$, проходящие через 0, являются выпуклыми конусами. В частности, их пересечения тоже выпуклые конусы.

Выпуклая комбинация

Definition

Выпуклой комбинацией точек x_1, \dots, x_k называется любая точка вида

$$\theta_1 x_1 + \dots + \theta_k x_k,$$

где $\theta_1 + \dots + \theta_k = 1$ и $0 \leq \theta_i \leq 1$ для всех i .

Proposition

Если S является выпуклым множеством и $x_1, \dots, x_k \in S$, то любая выпуклая комбинация точек x_1, \dots, x_k также принадлежит S .

Доказательство

Доказательство.

Доказательство проведем индукцией по k .

База при $k = 2$ верна. Пусть утверждение верно для $k - 1$.

Переход: рассмотрим $x_1, \dots, x_k \in S$ и пусть $\theta_1, \dots, \theta_k$ таковы, что $\theta_1 + \dots + \theta_k = 1$ и $0 \leq \theta_i \leq 1$. Если $\theta_k = 1$, то утверждение очевидно. В противном случае перепишем комбинацию:

$$\theta_1 x_1 + \dots + \theta_k x_k = (1 - \theta_k) \left(\frac{\theta_1}{1 - \theta_k} x_1 + \dots + \frac{\theta_{k-1}}{1 - \theta_k} x_{k-1} \right) + \theta_k x_k,$$

где каждое слагаемое $\frac{\theta_i}{1 - \theta_k}$ лежит в интервале $[0, 1]$, а их сумма равна 1. По предположению индукции и определению выпуклого множества, утверждение верно для k . □

Выпуклая оболочка

Definition

Выпуклой оболочкой множества S называется наименьшее по включению выпуклое множество T , содержащее S . То есть, это пересечение всех выпуклых множеств, содержащих S . Обычно выпуклую оболочку обозначают $\text{conv } S$.

Выпуклая оболочка является выпуклым множеством.

Theorem

Выпуклая оболочка множества S равна множеству всех выпуклых комбинаций элементов S , то есть

$$\text{conv } S = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \{ \theta_1 x_1 + \dots + \theta_k x_k \mid \theta_1 + \dots + \theta_k = 1, 0 \leq \theta_i \leq 1, x_i \in S \}.$$

Множество S является выпуклым тогда и только тогда, когда $S = \text{conv } S$.

Доказательство теоремы

Доказательство.

Пусть x — произвольная выпуклая комбинация элементов S . Это значит, что она также является выпуклой комбинацией выпуклого множества $\text{conv } S$, тк $S \subset \text{conv } S$. Поэтому $x \in \text{conv } S$, то есть выполняется вложение справа налево.

Доказательство теоремы

Доказательство.

Пусть x — произвольная выпуклая комбинация элементов S . Это значит, что она также является выпуклой комбинацией выпуклого множества $\text{conv } S$, тк $S \subset \text{conv } S$. Поэтому $x \in \text{conv } S$, то есть выполняется вложение справа налево.

Докажем вложение в обратную сторону. Заметим, что

$\cup_{k \in \mathbb{N}} \{\theta_1 x_1 + \dots + \theta_k x_k \mid \theta_1 + \dots + \theta_k = 1, 0 \leq \theta_i \leq 1\}$ является выпуклым множеством, так как если x и y выпуклые комбинации S , то $\theta x + (1 - \theta)y$ является выпуклой комбинацией большей размерности для $\theta \in [0, 1]$. Поэтому вложение выполняется. Значит эти множества равны. □

Пример на выпуклую оболочку

Example

Чему равна $\text{conv}\{xx^T | x \in \mathbb{R}^n, \|x\|_2 = 1\}$?

Пример на выпуклую оболочку

Example

Чему равна $\text{conv}\{xx^T | x \in \mathbb{R}^n, \|x\|_2 = 1\}$?

Для начала докажем вложение слева направо. Рассмотрим $x \in \mathbb{R}^n : \|x\|_2 = 1$. Покажем, что след матрицы xx^T равен 1:

$$\text{Tr}(xx^T) = \text{Tr}(x^T x) = \|x\|_2^2 = 1.$$

Теперь рассмотрим матрицу $A \in \{xx^T | x \in \mathbb{R}^n, \|x\|_2 = 1\}$. По вышедоказанной теореме мы имеем, что

$A = \theta_1 x_1 x_1^T + \theta_2 x_2 x_2^T + \dots + \theta_n x_n x_n^T$, где $\theta_i \geq 0$, $\|x_i\|_2 = 1$ и $\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n = 1$. Поэтому, используя линейность следа, мы получаем $\text{Tr}(A) = 1$.

Пример на выпуклую оболочку

Далее докажем вложение справа налево. Пусть $A \in \mathcal{S}_+^n$ и $\text{Tr}(A) = 1$. Матрица A симметрична, значит у нее есть базис из собственных векторов. Применяя спектральное разложение мы получаем, что $A = S^T(\lambda_1, \dots, \lambda_n)S$, где S - ортогональная матрица. Заметим, что

$$\begin{aligned}\text{Tr}(S^T(\lambda_1, \dots, \lambda_n)S) &= \text{Tr}(SS^T(\lambda_1, \dots, \lambda_n)) = \\ \text{Tr}((\lambda_1, \dots, \lambda_n)) &= \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 1.\end{aligned}$$

Из спектрального разложения мы делаем вывод, что $A = \lambda_1 s_1 s_1^T + \lambda_2 s_2 s_2^T + \dots + \lambda_n s_n s_n^T$, где s_i - соответствующие нормированные собственные вектора. Это завершает доказательство.

Другие оболочки

Definition

Конической оболочкой множества C называется множество

$$\cup_{k=1}^{\infty} \{ \theta_1 c_1 + \dots + \theta_k c_k \mid c_i \in C, \theta_i \geq 0, i = 1, \dots, k \}.$$

Коническая оболочка является выпуклым конусом.

Definition

Аффинной оболочкой $\text{aff } S$ множества S называется множество

$$\text{aff } S := \cup_{k=1}^{\infty} \{ \theta_1 x_1 + \dots + \theta_k x_k \mid \theta_1 + \dots + \theta_k = 1, x_i \in S, i = 1, \dots, k \}.$$

Аффинная оболочка $\text{aff } S$ любого мн-ва S может быть представлена как сумма единственного линейного подпространства L_S и представителя $y \in \text{aff } S$, то есть $\text{aff } S = L_S + y$.

Теорема Каратеодори

Для любого множества S можно определить его размерность как $\dim S = \dim \text{aff } S = \dim L_S$.

Theorem

Пусть дано множество S и $\dim \text{conv } S = d$. Тогда любой элемент $\text{conv } S$ представляется как выпуклая комбинация не более чем $d + 1$ точки множества S .

Теоремы отделимости

Theorem (Теорема об отделимости)

Пусть S и T - непересекающиеся непустые выпуклые множества в \mathbb{R}^n . Тогда найдутся $a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ и $b \in \mathbb{R}$ такие, что $\forall x \in S: a^T x \leq b$ и $\forall y \in T: a^T y \geq b$.

То есть любые два непересекающиеся выпуклых множества можно разделить гиперплоскостью.

Theorem (Теорема о строгой отделимости)

Пусть S и T - непересекающиеся непустые выпуклые множества в \mathbb{R}^n , причем S - компакт, а T - замкнуто. Тогда найдутся $a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ и $b \in \mathbb{R}$ такие, что $\sup_{x \in S} a^T x < b < \inf_{y \in T} a^T y$.

Лемма Фаркаша

Theorem

Рассмотрим систему строгих неравенств $Ax < b$, где $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$ и $b \in \mathbb{R}^n$. Она неразрешима тогда и только тогда, когда найдется $\lambda \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$: $\lambda^T A = 0$, $\lambda \geq 0$ и $\lambda^T b \leq 0$.

Hint. Рассмотреть отделимость множеств $\{b - Ax | x \in \mathbb{R}^m\}$ и $\{x \in \mathbb{R}^n | x \geq 0\}$.

Неразрешимость линейного неравенства от x , который лежит в m -мерном пространстве, сводится к разрешимости системы равенств и неравенств от переменной из n -мерного пространства.