Analiza 2a

Ruslan Urazbakhtin

29. julij 2025

[verzija 29. julij 2025]

Kazalo

1 Hilbertovi prostori

1.1 Vektorski prostori s skalarnim produktom

Naj bo X vektorski prostor nad $\mathbb{R}$ (ali nad $\mathbb{C}$).

Definicija 1.1. **Skalarni produkt** je preslikava $\langle\ ,\ \rangle : X \times X \to \mathbb{R}$ (oz. $\mathbb{C}$) za katero velja:

1. $\forall x \in X \,.\, \langle x,\, x\rangle \geq 0$;
2. $\forall x \in X \,.\, \langle x,\, x\rangle = 0 \iff x = 0$;
3. $\forall x, y \in X \,.\, \langle x,\, y\rangle = \overline{\langle y,\, x\rangle}$;
4. $\forall x, y, z \in X \,.\, \forall \lambda, \mu \in \mathbb{R}$ (oz. $\mathbb{C}$) $.\ \langle \lambda x + \mu y,\, z\rangle = \lambda \langle x,\, z\rangle + \mu \langle y,\, z\rangle$.

Opomba 1.2. 1.-2. je **pozitivna definitnost** skalarnega produkta, 3. je **poševna simetričnost** (**simetričnost** nad $\mathbb{R}$), 4. je linearnost v prvem faktorju.

Trditev 1.3 (Cauchy-Schwartzova neenakost)**.** *Naj bo $\langle\ ,\ \rangle$ skalarni produkt na X. Velja:*

$$\forall x, y \in X \,.\, |\langle x,\, y\rangle| \leq \sqrt{\langle x,\, x\rangle} \cdot \sqrt{\langle y,\, y\rangle} = ||x|| \cdot ||y||.$$

Dokaz. Nad $\mathbb{R}$: Definiramo $t \to \langle x + ty,\, x + ty\rangle = f(t) \geq 0$.
Nad $\mathbb{C}$: Naj bo $x, y \in X$. Obstaja $\alpha \in \mathbb{C},\ |\alpha| = 1$, da $\langle x,\, y\rangle = \alpha \cdot |\langle x,\, y\rangle|$. □

Definicija 1.4. **Norma** na vektorskem prostoru X je preslikava $||\ || : X \to \mathbb{R}$ za katero velja:

1. $\forall x \in X \,.\, ||x|| \geq 0$;
2. $\forall x \in X \,.\, ||x|| = 0 \iff x = 0$;
3. $\forall \lambda \in \mathbb{R}$ (oz. $\mathbb{C}$) $.\ ||\lambda x|| = |\lambda| \cdot ||x||$;
4. Trikotniška neenakost: $\forall x, y \in X \,.\, ||x + y|| \leq ||x|| + ||y||$.

Trditev 1.5. *Naj bo $(X, \langle\ ,\ \rangle)$ vektorski prostor s skalarnim produktom. Potem je $(X, ||\ ||)$, kjer je $\forall x \in X \,.\, ||x|| = \sqrt{\langle x,\, x\rangle}$, vektorski prostor z normo.*

Dokaz. Preverimo lastnosti. Za trikotniško neenakost uporabimo CS neenakost. □

Trditev 1.6. *Naj bo $(X, ||\ ||)$ vektorski prostor s normo. Potem je (X, d), kjer je metrika definirana s predpisom $\forall x, y \in X \,.\, d(x, y) = ||x - y||$, metrični prostor.*

Dokaz. Preverimo lastnosti. □

1.2 Hilbertovi prostori

Definicija 1.7. **Hilbertov prostor** je vektorski prostor X s skalarnim produktom $\langle\ ,\ \rangle$, ki je v metriki, porojeni iz skalarnega produkta, poln metrični prostor.

Opomba 1.8. $(X, \langle\ ,\ \rangle) \rightsquigarrow (X, ||\ ||) \rightsquigarrow (X, d)$, kjer je $\forall x, y \in X \,.\, d(x, y) = ||x - y||$.

Opomba 1.9. **Banachov prostor** je vektorski prostor X z normo $||\ ||$, ki je v metriki, porojeni iz norme, poln metrični prostor.

Zgled 1.10.

1. Naj bo $X = \mathbb{R}^n$. Definiramo skalarni produkt. Naj bo $x, y \in \mathbb{R}^n,\ x = (x_1 \ldots, x_n)$ in $y = (y_1, \ldots, y_n)$. **Standardni skalarni produkt** je
$$x \cdot y = \sum_{k=1}^{n} x_k y_k.$$
Ta skalarni produkt nam da normo
$$||x|| = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} x_k^2},$$
ki porodi metriko
$$d_2(x,y) = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} (x_k - y_k)^2}.$$
Vemo, da je $(\mathbb{R}^n, d_2)$ poln metrični prostor. Torej $(\mathbb{R}^n, \cdot)$ Hilbertov prostor.
2. Na $\mathbb{R}^n$ lahko definiramo tudi druge norme, npr.
   - $||x||_\infty = \max\{|x_1|, \ldots, |x_n|\}$;
   - $||x||_1 = |x_1| + \ldots + |x_n|$.

   Te dve normi ne prideta iz skalarnega produkta, ker za njih ne velja paralelogramsko pravilo. $(\mathbb{R}^n, ||x||_\infty)$ in $(\mathbb{R}^n, ||x||_1)$ sta Banachova prostora.
3. Naj bo $X = \mathbb{C}^n$. Definiramo skalarni produkt. Naj bo $z, w \in \mathbb{C}^n,\ z = (z_1 \ldots, z_n)$ in $w = (w_1, \ldots, w_n)$. **Standardni skalarni produkt** je
$$z \cdot w = \sum_{k=1}^{n} z_k \overline{w_k}.$$
Ta skalarni produkt nam da normo
$$||z|| = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} |z_k|^2},$$
ki porodi metriko
$$d_2(z,w) = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} |z_k - w_k|^2}.$$
Vemo, da je $(\mathbb{C}^n, d_2)$ poln metrični prostor. Torej $(\mathbb{C}^n, \cdot)$ Hilbertov prostor.

1.3 Prostor $L^2([a,b])$

Opomba 1.11. Števili a, b sta lahko končni ali $\pm\infty$.

Trditev 1.12. *Naj bo $C([a,b])$ vektorski prostor nad $\mathbb{R}$. Potem je s predpisom*
$$\forall f, g \in C([a,b]) \,.\, \langle f,\, g\rangle = \int_a^b f(x)g(x)\,dx$$
definiran skalarni produkt na $C([a,b])$.

Dokaz. Preverimo lastnosti. □

Trditev 1.13. $(C([a,b]), \langle\ ,\ \rangle)$ *ni Hilbertov prostor.*

Dokaz. Definiramo $f_n(x) = \begin{cases} 1; & \frac{1}{n} \le x \le 1 \\ nx; & -\frac{1}{n} < x < \frac{1}{n} \\ -1; & -1 \le x \le -\frac{1}{n} \end{cases}$. Pokažemo, da je $(f_n)_n$ Cauchyjevo zaporedje v $C([a,b])$, ki nima limite. □

Zgled 1.14. Vzemimo prostor $((0,1), d_2)$. Z dodajanjem limitnih točk $\{-1, 1\}$ ta prostor postane poln.

Definicija 1.15. Naj bo (M, d) metrični prostor. Pravimo, da lahko **napolnimo** prostor M, če obstaja prostor $(\overline{M}, \overline{d})$, za kateri velja:

1. $(\overline{M}, \overline{d})$ je poln metrični prostor;
2. $M \subseteq \overline{M}$;
3. $\overline{d}|_{M \times M} = d$;
4. M je gost v $\overline{M}$, tj. $\operatorname{Cl} M = \overline{M}$.

Prostoru $\overline{M}$ rečemo **napolnitev** prostora M.

Opomba 1.16. Ideja: $\overline{M}$ je prostor vseh limit Cauchyjevih zaporedij v M (+ kvocient).

Opomba 1.17. Označili smo z $L^1(A) = \{f : A \to \mathbb{R} \mid \int_A |f|\,dx \text{ obstaja, } f \text{ zvezna s.p.}\}/_\sim$ prostor vseh absolutno integrabilnih funkcij, kjer je $\forall f, g \in L^1 \,.\, f \sim g \iff f = g$ s.p.

Vpeljemo zdaj s kvadratom integrabilne funkcije:

Definicija 1.18. Prostor $L^2([a,b])$ je

$$L^2([a,b]) = \{f : [a,b] \to \mathbb{R} \mid \int_a^b f^2(x)\,dx \text{ obstaja, } f \text{ zvezna s.p.}\}/_\sim,$$

kjer je $\forall f, g \in L^2 \,.\, f \sim g \iff f = g$ s.p.

V tem prostoru gotovo so

- Zvezne funkcije: $C([a,b]) \subseteq L^2([a,b])$;
- Odsekoma zvezni funkciji;
- $f(x) = \frac{1}{\sqrt[4]{x-a}}$ itd.

Cilj Želimo posplošiti prostor $(\mathbb{R}, \cdot)$.
Naj bo $f, g \in L^2$, potem $|f \cdot g| \le \frac{|f|^2 + |g|^2}{2} \implies f \cdot g \in L^1([a,b])$. Torej lahko definiramo

$$\langle f, g \rangle = \int_a^b f(x) g(x)\,dx.$$

Trditev 1.19. $L^2([a,b])$ *je vektorski prostor nad* $\mathbb{R}$.

Dokaz. Preverimo lastnosti. □

Torej $L^2([a,b])$ je vektorski prostor nad $\mathbb{R}$ s skalarnim produktom

$$\langle f,\, g\rangle = \int_a^b f(x)g(x)\,dx.$$

Očitno, da je $C([a,b]) \subseteq L^2([a,b])$.

Izrek 1.20. *$L^2([a,b])$ je Hilbertov in $L^2([a,b])$ je napolnitev $C([a,b])$.*

Opomba 1.21. Prostor $C([a,b])$ je gost v prostoru $L^2([a,b])$, tj.

$$\forall f \in L^2([a,b])\,.\,\exists f_n \in C([a,b])\,.\,\lim_{n\to\infty} f_n = f,$$

kjer

$$\lim_{n\to\infty} f_n = f \iff \lim_{n\to\infty} ||f_n - f|| = 0 \iff \lim_{n\to\infty} \sqrt{\int_a^b (f_n(x) - f(x))^2\,dx} = 0.$$

Opomba 1.22. Nad $\mathbb{C}$: $f = u + iv,\ u, v : [a,b] \to \mathbb{R}$. Potem

$$\int_a^b f(x)\,dx = \int_a^b u(x)\,dx + i\int_a^b v(x)\,dx$$

in

$$\langle f,\, g\rangle = \int_a^b f(x)\overline{g(x)}\,dx.$$

Zgled 1.23. Vzemimo $[0,1]$. Definiramo $f_n(x) = \begin{cases} \sqrt{n}; & 0 < x \leq \frac{1}{n} \\ 0; & \text{sicer} \end{cases}$.
Čemu je enaka $\lim_{n\to\infty} f_n(x)$ za vse $x \in [0,1]$ (po točkah)? Ali je $\lim_{n\to\infty} f_n(x) = 0$ v $L^2([0,1])$?

Zgled 1.24. Definiramo zaporedje $f_n : [0,1] \to \mathbb{R}$ po pravilu: začnemo z $f_1 \equiv 1$. Nato nadaljujemo

$$f_2 = \begin{cases} 1; & x \in [0, \frac{1}{2}] \\ 0, & \text{sicer} \end{cases},\ f_3 = \begin{cases} 1; & x \in [\frac{1}{2}, 1] \\ 0, & \text{sicer} \end{cases},\ f_4 = \begin{cases} 1; & x \in [0, \frac{1}{3}] \\ 0, & \text{sicer} \end{cases},\ f_5 = \begin{cases} 1; & x \in [\frac{1}{3}, \frac{2}{3}] \\ 0, & \text{sicer} \end{cases}$$

in tako naprej. Ali obstaja limita po točkah? Ali obstaja limita v L^2 smislu?

1.4 Ortogonalnost

Definicija 1.25. Naj bo $(X, \langle\ ,\ \rangle)$ vektorski prostor s skalarnim produktom, $A \subseteq X$, $A \neq \emptyset$. Naj bosta $x, y \in X$.
- x je **pravokoten** na y, če $\langle x,\, y\rangle = 0$, tj. $x \perp y \iff \langle x,\, y\rangle = 0$.
- **Ortogonalni komplement** množice A je $A^\perp = \{x \in X \mid \forall a \in A\,.\,x \perp a\}$.

Trditev 1.26. *$A^\perp$ je vektorski podprostor v X.*

Dokaz. Preverimo homogenost in linearnost. □

Opomba 1.27. $A \subseteq (A^\perp)^\perp$.

Trditev 1.28. *Naj bo $(X, \langle\ ,\ \rangle)$ vektorski prostor s skalarnim produktom, $v \in X$. Definiramo $f : X \to \mathbb{R}$, $f(x) = \langle x, v\rangle$. Potem f je zvezna na X.*

Dokaz. Pokažemo, da je f Lipshitzeva. □

Posledica 1.29. *$A^\perp$ je zaprt vektorski podprostor.*

Dokaz. Pokažemo, da je limita vsakega zaporedja v $A^\perp$ tudi leži v $A^\perp$. □

Opomba 1.30. $C([a, b]) \subseteq L^2([a, b])$ ni zaprt podprostor.

Opomba 1.31. Če je $(X, \langle\ ,\ \rangle)$ Hilbertov in $A \subseteq X$ zaprt podprostor, potem

$$(A^\perp)^\perp = A.$$

Trditev 1.32 (Pitagorjev izrek)**.** *Naj bo $(X, \langle\ ,\ \rangle)$ vektorski prostor s skalarnim produktom. Naj bodo $x_1, \ldots, x_n \in X$ taki, da $\forall i, j \in [n] \,.\, i \neq j \implies x_j \perp x_j$. Tedaj*

$$||x_1 + \ldots + x_n||^2 = ||x_1||^2 + \ldots + ||x_n||^2.$$

Dokaz. Izračunamo normo po definiciji. □

Definicija 1.33. Naj bo $(X, \langle\ ,\ \rangle)$ vektorski prostor s skalarnim produktom in $Y \leq X$ podprostor X. Naj bo $x \in X$. **Pravokotna projekcija** vektorja x na podprostor Y (če obstaja) je tak vektor $P_Y(x) \in Y$, da je

$$x - P_Y(x) \in Y^\perp.$$

Trditev 1.34. *Če je pravokotna projekcija x na Y obstaja, je enolično določena. Če obstaja, je to najboljša aproksimacija vektorja x z vektorji iz Y, tj.*

$$||x - P_y(x)|| = \min_{w \in Y} ||x - w||.$$

Dokaz. Enoličnost: Običajen način.
Aproksimacija: Definicija minimuma in Pitagorjev izrek 1.32. □

Zgled 1.35. Naj bosta $Y = C([a, b])$ in $X = L^2([a, b])$. Če si izberimo $f \in X \setminus Y$, potem f nima najboljše aproksimacije z zveznimi funkcijami, saj, ker je $\mathrm{Cl}(C([a, b])) = L^2([a, b])$, bi veljalo $||f - P_{C([a,b])}(f)|| = 0$ in posledično $f \in C([a, b])$.

Opomba 1.36.

1. $P_Y^2 = P_Y$.
2. $||x|| \geq ||P_Y(x)||$, saj $x = \underbrace{x - P_Y(x)}_{Y^\perp} + \underbrace{P_Y(x)}_{Y}$.
3. Če je P_Y definiran na X, potem je linearen in zvezen.

   Dokaz. Definicija in enoličnost projekcije. □

4. Če je P_Y definiran na X, je Y zaprt podprostor.

   Dokaz. Vzamemo konvergentno zaporedje v Y in upoštevamo zveznost P_Y. □

5. Če ima x pravokotno projekcijo na Y, ima tudi pravokotno projekcijo na $Y^{\perp}$.

   Dokaz. Vzamemo $x - P_Y(x)$. □

Trditev 1.37. *Naj bo $Y \leq X$ končno dimenzionalen podprostor z ON bazo $\{e_1, \ldots, e_n\}$, tj. $\langle e_i, e_j \rangle = \delta_{ij}$. Naj bo $x \in X$. Tedaj je*

$$P_Y(x) = \sum_{j=1}^{n} \langle x, e_j \rangle e_j.$$

Dokaz. Definicija projekcije. □

Opomba 1.38. Vsak končno dimenzionalni podprostor ima pravokotno projekcijo definirano na X in tudi vsi tisti podprostori končne kodimenzije.

1.5 Ortogonalni sistem

Definicija 1.39. Naj bo $(X, \langle\ ,\ \rangle)$ vektorski prostor s skalarnim produktom.

- Sistem vektorjev $(e_j)_{j=1}^{\infty}$ je **ortogonalen sistem (OS)**, če

$$\forall i, j \in \mathbb{N} \,.\, i \neq j \implies \langle e_i, e_j \rangle = 0.$$

- Tak sistem je **ortonormiran (ONS)**, če

$$\forall i, j \in \mathbb{N} \,.\, \langle e_i, e_j \rangle = \delta_{ij}.$$

Trditev 1.40 (Besselova neenakost)**.** *Naj bo*

- *X vektorski prostor s skalarnim produktom, $x \in X$;*
- *$(e_j)_{j=1}^{\infty}$ ONS.*

Tedaj

$$\sum_{j=1}^{\infty} |\langle x, e_j \rangle|^2 \leq ||x||^2.$$

Dokaz. Definiramo $Y_n = \text{Lin}(\{e_1, \ldots, e_n\})$. Uporabimo formulo za pravokotno projekcijo na končnorazsežen prostor 1.37 ter Pitagorjev izrek 1.32. □

Posledica 1.41. $\lim_{j \to \infty} \langle x, e_j \rangle = 0$.

Opomba 1.42.

- Absolutno vrednost potrebujemo, če gledamo prostor nad $\mathbb{C}$.
- $(\langle x, e_j \rangle)_{j=1}^{\infty}$ so **Fourierjevi koeficienti** x po ONS $(e_j)_{j=1}^{\infty}$.

Trditev 1.43. *Naj bo*

- *X vektorski prostor s skalarnim produktom;*
- *$(e_j)_{j=1}^{\infty}$ ONS.*
- *$(c_j)_{j=1}^{\infty}$ zaporedje števil (bodisi $\mathbb{R}$ bodisi $\mathbb{C}$);*
- *$\sum_{j=1}^{\infty} |c_j|^2 < \infty$;*

Tedaj obstaja $x \in X$, za katerega velja

$$\forall j \in \mathbb{N} \,.\, c_j = \langle x, e_j \rangle.$$

Velja tudi:

$$x = \sum_{j=1}^{\infty} c_j e_j = \lim_{N \to \infty} \sum_{j=1}^{N} c_j e_j.$$

Dokaz. Trdimo, da je $\left(\sum_{j=1}^{N} c_j e_j\right)_N$ Cauchyjevo zaporedje. □

Opomba 1.44. Naj bo X Hilbertov prostor ter $(e_j)_{j=1}^{\infty}$ ONS. Vzemimo $x \in X$. Iz Besselovi neenakosti 1.40 sledi, da za zaporedje $c_j = \langle x,\, e_j \rangle$ velja, da

$$\sum_{j=1}^{\infty} |c_j|^2 < \infty.$$

Torej po trditvi 1.43 sledi, da obstaja $\widetilde{x}$, za kateri velja

$$\widetilde{x} = \sum_{j=1}^{\infty} \langle x,\, e_j \rangle\, e_j.$$

Ali je $\widetilde{x} = x$?

Definicija 1.45. Naj bo X Hilbertov prostor. ONS $(e_j)_{j=1}^{\infty}$ je **kompleten** (KONS) ali **poln**, če

$$\forall x \in X \,.\, x = \sum_{j=1}^{\infty} \langle x,\, e_j \rangle\, e_j.$$

Izrek 1.46. *Naj bo*
- *X Hilbertov prostor;*
- *$(e_j)_{j=1}^{\infty}$ ONS.*

NTSE
1. *$(e_j)_{j=1}^{\infty}$ je KONS;*
2. *$\forall x, y \in X \,.\, \langle x,\, y \rangle = \sum_{j=1}^{\infty} \langle x,\, e_j \rangle \langle e_j,\, y \rangle$;*
3. *Parsevalova enakost: $\forall x \in X \,.\, ||x||^2 = \sum_{j=1}^{\infty} |\langle x,\, e_j \rangle|^2$;*
4. *ONS $(e_j)_{j=1}^{\infty}$ ni vsebovan v nobenem strogo večjem ONS;*
5. *Edini vektor, ki je pravokoten na vse vektorji e_j, je vektor 0;*
6. *Končne linearne kombinacije vektorjev e_j so goste v X.*

Dokaz. Dokažemo (1) $\implies$ (2) $\implies$ (3) $\implies$ (4) $\implies$ (5) in (1) $\implies$ (6) $\implies$ (5). (5) $\implies$ (1): Uporabimo trditev 1.43 ter oglejmo razliko $x - \widetilde{x}$. □

Zgled 1.47 (Modelni Hilbertov prostor)**.** Definiramo

$$l^2 = \{(a_j)_j \mid a_j \in \mathbb{R}, \sum_{j=1}^{\infty} |a_j|^2 < \infty\}.$$

Vpeljemo skalarni produkt s predpisom

$$\langle (a_j)_j,\, (b_j)_j \rangle = \sum_{j=1}^{\infty} a_j b_j \quad (\text{oz. } \sum_{j=1}^{\infty} a_j \overline{b_j} \text{ nad } \mathbb{C}).$$

Tedaj velja

$$||(a_i)_i||_2^2 = \sum_{j=1}^{\infty} |a_j|^2.$$

Naj bo zdaj X Hilbertov prostor, $x \in X$ ter $(e_j)_{j=1}^{\infty}$ KONS. Tedaj

$$(\langle x,\, e_j \rangle)_j \in l^2.$$

1.6 Prostor $L^2([-\pi,\pi])$

Definiramo sistem

$$\{\frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{1}{\sqrt{\pi}}\cos x, \frac{1}{\sqrt{\pi}}\sin x, \frac{1}{\sqrt{\pi}}\cos 2x, \frac{1}{\sqrt{\pi}}\sin 2x, \ldots, \frac{1}{\sqrt{\pi}}\cos nx, \frac{1}{\sqrt{\pi}}\sin nx, \ldots\}.$$

Trdimo, da je to ONS. Nad $\mathbb{C}$:

$$\{\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{inx} \mid n \in \mathbb{N}\}.$$

2 Kompleksna analiza

2.1 Kompleksna števila

Definicija 2.1. Kompleksna števila so urejeni pari realnih števil $(a, b) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}$.

V $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ v vpeljemo operacije

$$(a, b) + (c, d) = (a + c, b + d)$$
$$(a, b) \cdot (c, d) = (ac - bd, ad + bc)$$

S tema operacijama $\mathbb{R}^2$ postane komutativni obseg $\mathbb{C}$. Pri tem je $\mathbb{R} \subseteq \mathbb{C}$, če $a \in \mathbb{R}$ identificiramo z $(a, 0)$, kar inducira običajni operaciji v $\mathbb{R}$.

Definicija 2.2. Element $(0, 1)$ označimo z i in imenujemo **imaginarna enota.**

Velja:

$$i^2 = -1.$$

Vsako kompleksno število $z = (a, b)$ lahko predstavimo v obliki

$$z = a + ib = (a, 0) + (0, 1)(b, 0).$$

Če je $z = a + ib,\ a, b \in \mathbb{R}$, imenujemo a **realni del** kompleksnega števil