

Nevro, nano in kvantno računalništvo

red. prof. Aleš Holobar

el. pošta: ales.holobar@um.si

govorilne ure: petek, 13.00 - 15.00

kabinet: G2-36 (G2-2N.42)



Alan Turing

Vir slike: https://en.wikipedia.org/wiki/Alan_Turing

Turingov stroj

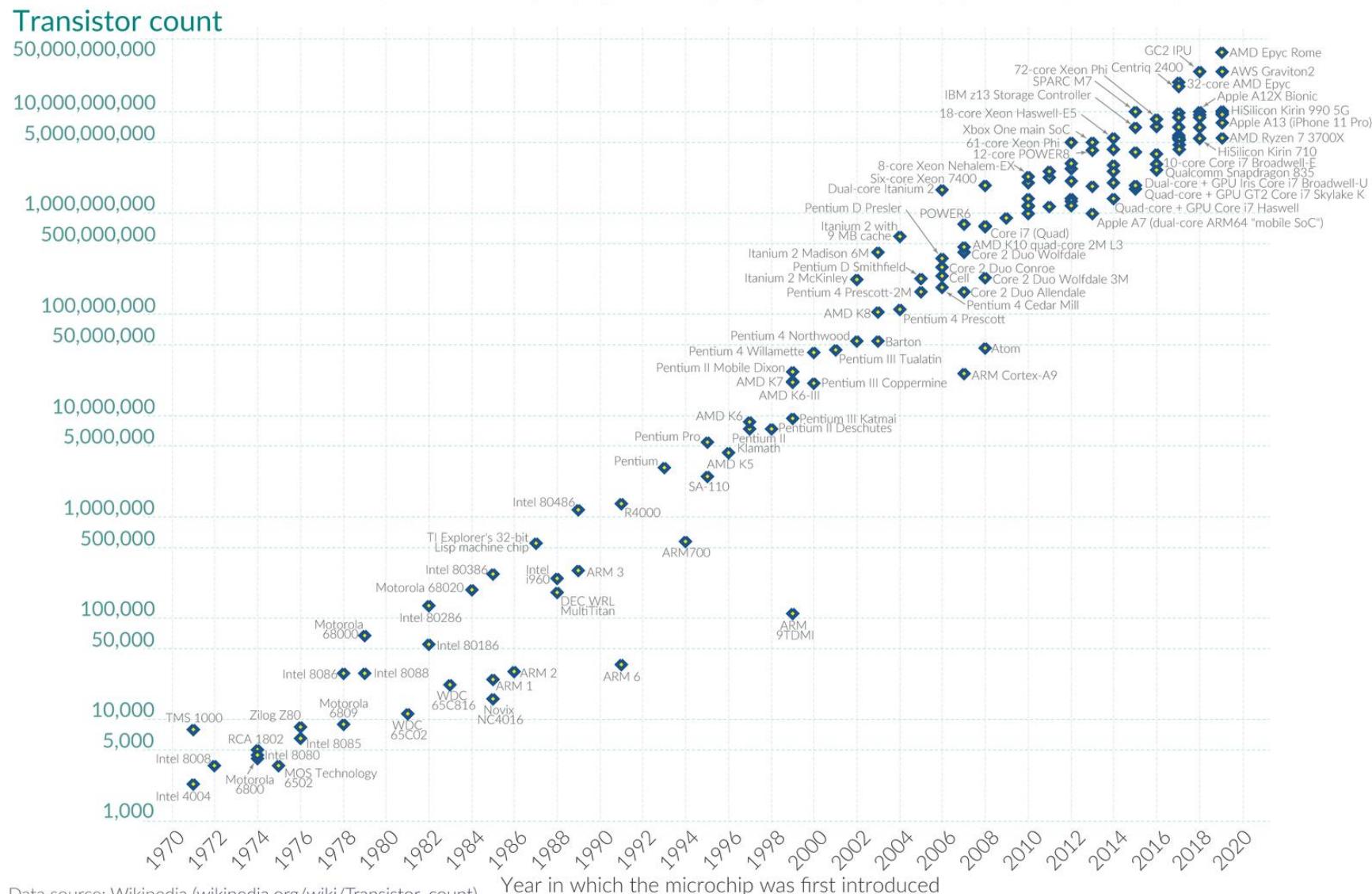
- Leta 1936, je v angleščini beseda "computer" pomenila osebo, katere delo je bilo računanje s pisalom in papirjem.
- A. Turing: "Takšen 'computer' lahko simuliramo s strojem".
- Kakšen stroj?
- Univerzalen stroj:
 - dolgi, enodimenzionalen papirnati trak,
 - trak se lahko premika naprej in nazaj, pri čemer se z njega berejo simboli, ki se lahko na podlagi prebranega tudi modificirajo.
 - Modifikacija simbola se izvrši izključno na podlagi: (1) prebranega simbola in (2) notranjega stanja stroja.
 - ker mora biti stroj fizično izvedljiv, mora biti število notranjih stanj končno.

Moorov zakon

Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

Our World
in Data



Data source: Wikipedia ([wikipedia.org/wiki/Transistor_count](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Transistor_count&oldid=1000000000))

OurWorldInData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

Vir: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moore%27s_Law_Transistor_Count_1970-2020.png

Turingov stroj (nadaljevanje)

- Alan Turing (1950): Computing machinery and intelligence. Mind, 59, 433-460:
 - **I believe that in about fifty years' time it will be possible, to programme computers, with a storage capacity of about 10^9 , to make them play the imitation game so well that an average interrogator will not have more than 70 per cent chance of making the right identification after five minutes of questioning.**
- Leta 2000 so imeli računalniki kapaciteto pomnilnika okoli 10^9 zlogov (en GB)
- Kaj pa sposobnost imitiranja?
 - ELIZA: simulacije psihoterapista, ki vedno sprašuje vprašanja o tvojih odgovorih (fury.com/aoliza)
 - **Dopolnjen Turingov test:** če želimo preveriti inteligenco stroja, moramo najprej zagotoviti minimalen nivo inteligence človeškega izpraševalca.
 - Kasparov in Deep Blue
 - Leta 1996 je program z imenom Otter rešil 60 let star odprt problem algeber imenovan Robbinsova konjektura(Robbins Conjecture).

Niti superračunalnik ne ve "Kaj je Slovenija"

2011: "Umetna inteligenca je premagala človeško, se po prsih tolčejo pri IBM-u, kjer so izdelali superračunalnik Watson - ta je namreč v kvizu Jeopardy premagal dva stara mačka"



YouTube - IBM and the Jeopardy Challenge

Eno izmed vprašanj v kvizu (pri temi Evropska unija) je bilo tudi: "Od leta 2010 sta Hrvaška in Makedonija kandidatki za članstvo, ta država pa je edina od držav nekdanje Jugoslavije v EU-ju."

Ne tekmovalca ne računalnik niso poznali pravega odgovora na vprašanje: Kaj je Slovenija?.

vir: www.rtvslo.si

Blue Gene

500 TFLOPS (65536 PPC 440 jeder)



Vir: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IBM_Blue_Gene_P_supercomputer.jpg

Naravno procesiranje - čeba

možgani odrasle čebele zasedajo 1 mm^3 in tehtajo 1 mg: $\sim 950\,000$ nevronov



akrobatski let
prepoznavanje vzorcev
navigacija
iskanje hrane
komunikacija

...

10^{-15} J/op

Silikonska vezja od 10^{-7} do 10^{-11} J/op

Čebelji možgani so za 10^8 do 10^4 x učinkovitejši od sodobnih silikonskih čipov

Sonar delfina



- Oddaja 200 piskov na sekundo!
- Razpon frekvenc 15 kHz – 120 kHz
- Izpopolnjeno polje senzorjev (celoten obraz)
- Razlikuje različne tipe in debeline aluminijastih folij.
- ‘Vidi’ teniško žogico na razdalji 75 m.
- Razlikuje med kovanci za 2 in 5 centov na razdalji 3 m.
- Zazna ribo, ki je v pesek zakopana do globine 0,5 m.
- Zelo dobro zazna različne oblike (tudi, ko so predmeti iz enakega materiala).

vir: W. W. L. Au (1993) The sonar of dolphins. (Springer).

Ljudje: Centralni živčni sistem

Will DeBello, Ph.D. — Using Machine Learning to Unravel the Brain's Wiring Diagram



UCDAVIS

Center for Neuroscience



Stran [youtube.com](https://www.youtube.com/watch?v=HXTov8wZ1DA) je zdaj prikazana čez celoten zaslon

Izhod iz celozaslonskega načina (Esc)



NEUROFEST 2023



Using Machine Learning to Unravel
the Brain's Wiring Diagram

Will DeBello, Ph.D.

Associate Professor of Neurobiology, Physiology and Behavior



Kaj pa neživa narava?

Vem le, da sem... Vse ostalo je iluzija
oz. interpretacija – tudi vi sami.

The illusion of time:

<https://www.nature.com/articles/d41586-018-04558-7>

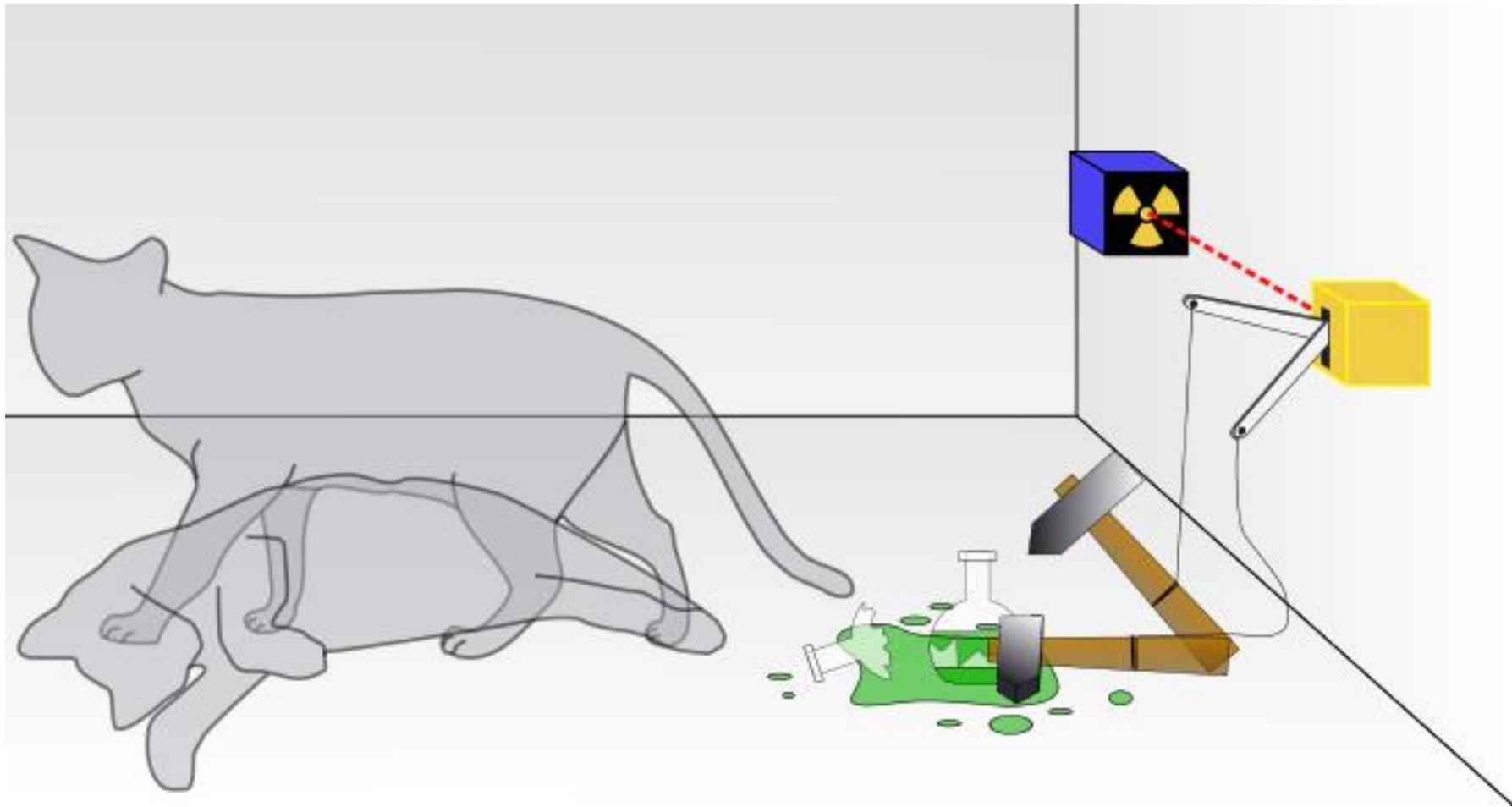
Zanimivosti in novice o kvantnem svetu

<https://www.zmescience.com/?s=quantum>

Zanimivosti in novice o kvantem računalniku:

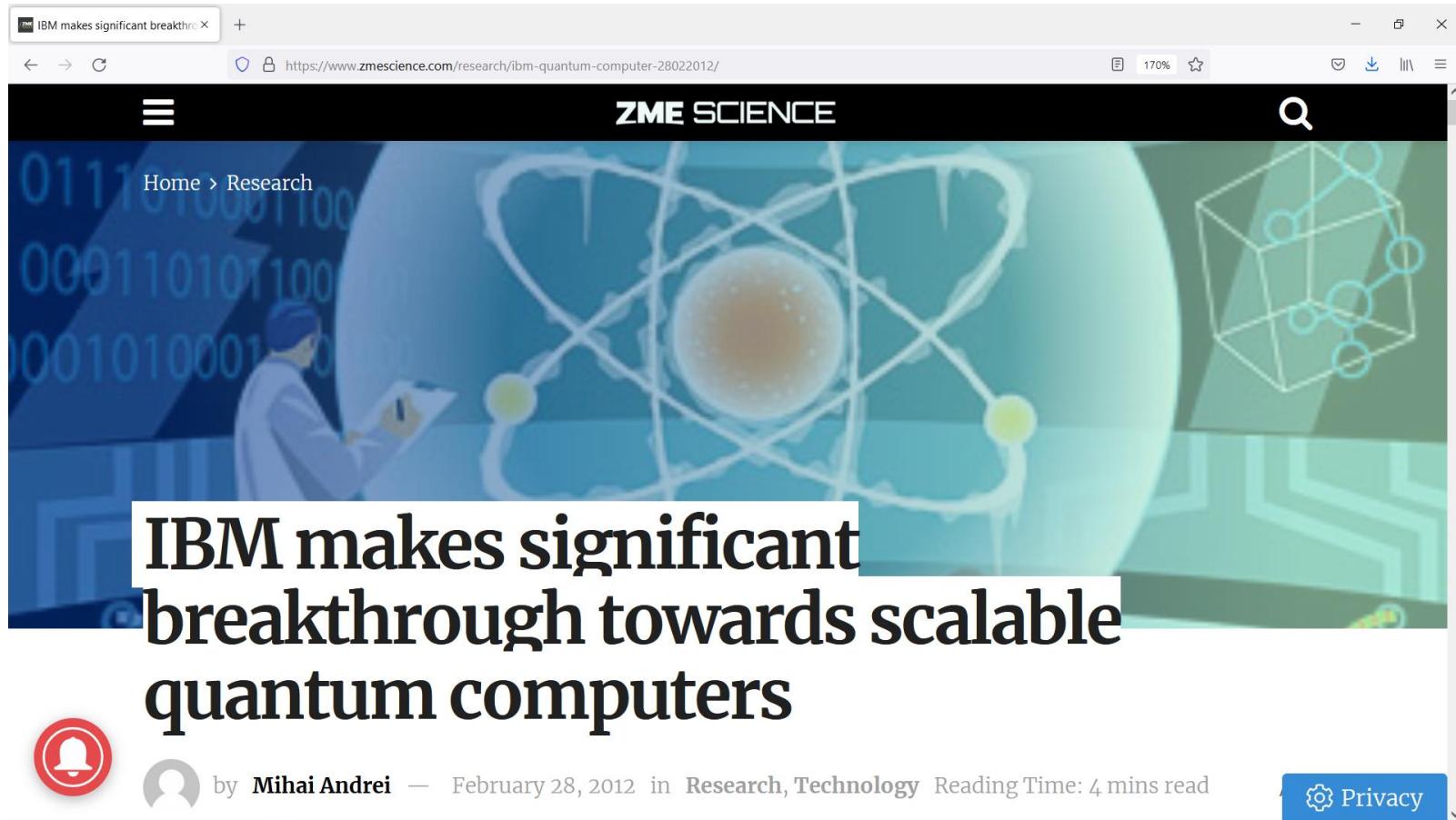
<https://www.zmescience.com/?s=quantum+computer>

Schrödingerjeva mačka



[Dhatfield](#) - Own work, vir: wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Schrödinger's_cat)

Kaj je kvantni računalnik?



The screenshot shows a web browser window with the URL <https://www.zmescience.com/research/ibm-quantum-computer-28022012/>. The page is from ZME SCIENCE and features a large image of a scientist in a lab coat working with a tablet, overlaid with binary code (01110001100...) and a 3D quantum circuit diagram. The main headline reads: "IBM makes significant breakthrough towards scalable quantum computers". Below the headline, there are author details ("by Mihai Andrei — February 28, 2012 in Research, Technology") and a reading time indicator ("Reading Time: 4 mins read"). A "Privacy" button is also visible.

IBM makes significant breakthrough towards scalable quantum computers

by Mihai Andrei — February 28, 2012 in Research, Technology Reading Time: 4 mins read

Privacy

Vir: <https://www.zmescience.com/research/ibm-quantum-computer-28022012/>

Najhitrejši kvantni računalniki na svetu

Manufacturer	Name/ codename designation	Architecture	Layout	Fidelity (%)	Qubits (physical)	Release date	Quantum volume
Atom Computing	N/A	Neutral atoms in optical lattices			1180 ^{[6][7]}	October 2023	
IBM	IBM Condor ^{[16][6]}	Superconducting	N/A	N/A	1121 ^[15]	December 2023	
CAS	Xiaohong ^[67]	Superconducting	N/A	N/A	504 ^[67]	2024	
IBM	IBM Osprey ^{[6][7]}	Superconducting	N/A	N/A	433 ^[15]	November 2022	
Xanadu	Borealis ^[65]	Photronics (Continuous-variable)	N/A	N/A	216 ^[65]	2022 ^[65]	
M Squared Lasers	Maxwell	Neutral atoms in optical lattices		99.5 (3-qubit gate), 99.1 (4-qubit gate) ^[32]	200 ^[33]	November 2022	
IBM	IBM Heron R2 ^[17]	Superconducting	Heavy hex	96.5 (2 qubits)	156	November 2024	
IBM	IBM Heron ^{[16][6]}	Superconducting	N/A	N/A	133	December 2023	
IBM	IBM Eagle	Superconducting	N/A	N/A	127 ^[15]	November 2021	
Atom Computing	Phoenix	Neutral atoms in optical lattices			100 ^[5]	August 10, 2021	
Rigetti	Ankaa-2	Superconducting transmon	N/A	98 (Two-qubit gates)	84 ^[54]	December 20, 2023	

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_quantum_processors

Najhitrejši kvantni računalniki na svetu

Annealing quantum processors [edit]

These QPUs are based on quantum annealing, not to be confused with digital annealing.^[68]

Manufacturer	Name/Codename /Designation	Architecture	Layout	Fidelity (%)	Qubits	Release date
D-Wave	D-Wave One (Rainier)	Superconducting	$C_4 = \text{Chimera}(4,4,4)^{[69]} = 4 \times 4 K_{4,4}$	N/A	128	May 11, 2011
D-Wave	D-Wave Two	Superconducting	$C_8 = \text{Chimera}(8,8,4)^{[69]} = 8 \times 8 K_{4,4}$	N/A	512	2013
D-Wave	D-Wave 2X	Superconducting	$C_{12} = \text{Chimera}(12,12,4)^{[69]} = 12 \times 12 K_{4,4}$	N/A	1152	2015
D-Wave	D-Wave 2000Q	Superconducting	$C_{16} = \text{Chimera}(16,16,4)^{[69]} = 16 \times 16 K_{4,4}$	N/A	2048	2017
D-Wave	D-Wave Advantage	Superconducting	Pegasus P ₁₆ ^[70]	N/A	5760	2020
D-Wave	D-Wave Advantage 2 ^{[71][72][73][74]}	Superconducting ^{[71][72]}	Zephyr Z ₁₅ ^{[74][75]}	N/A	7000+ ^{[71][72][73][74][75]}	Late 2024 either 2025 ^{[71][72][73][74][75]}

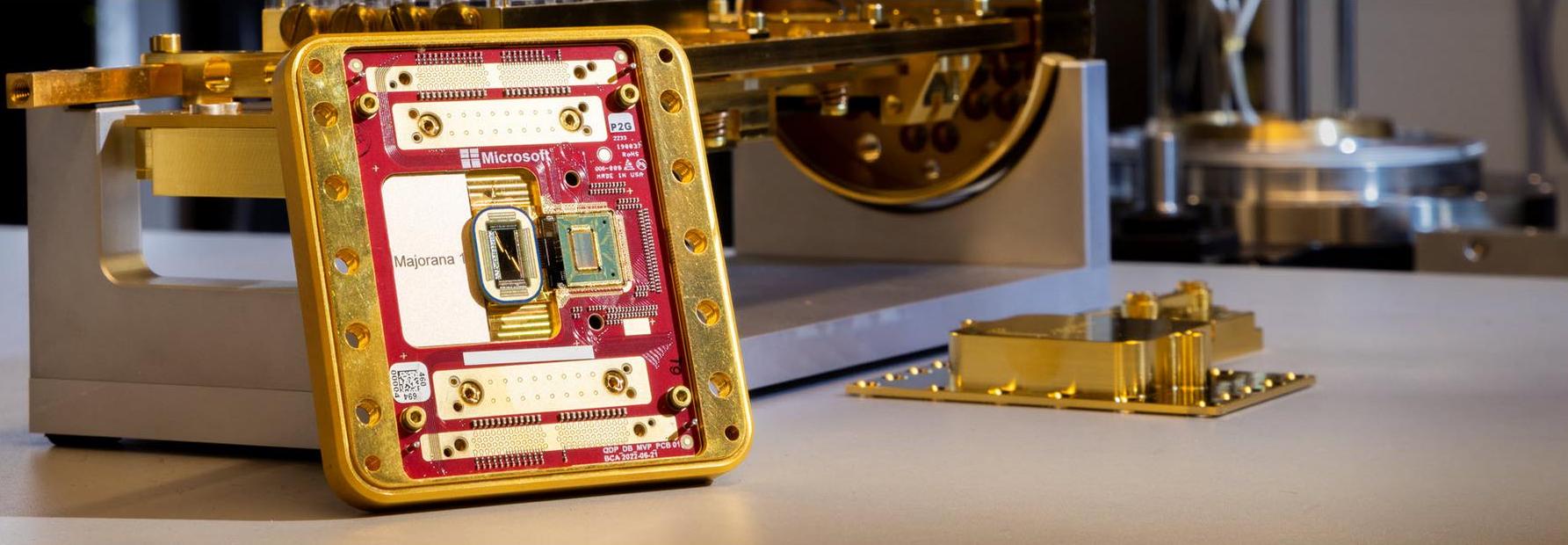
Analog quantum processors [edit]

These QPUs are based on analog Hamiltonian simulation.

Manufacturer	Name/Codename/Designation	Architecture	Layout	Fidelity (%)	Qubits	Release date
QuEra	Aquila	Neutral atoms	N/A	N/A	256 ^[76]	November 2022

Zadnji dosežki

Microsoft | Source



Microsoft's Majorana 1 chip carves new path for quantum computing

<https://news.microsoft.com/source/features/innovation/microsofts-majorana-1-chip-carves-new-path-for-quantum-computing/>

<https://www.youtube.com/watch?v=wSHmygPQukQ>

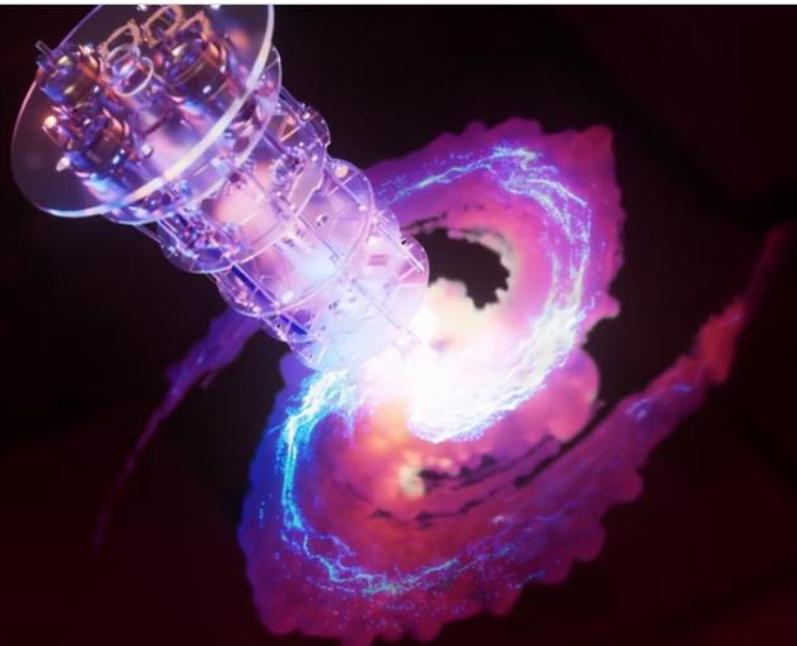
Zadnji dosežki

[PRODUCTS](#)[SUPPORT](#)[SOLUTIONS](#)[DEVELOPERS](#)[MORE +](#)

ENGLISH



Search Intel.com

[Intel Labs](#)[Discover Quantum Computing](#)

Quantum Computing Systems Achieving Quantum Practicality

Intel Labs is working to achieve quantum practicality, the transition of quantum technology from the lab to commercial quantum systems that solve real-world problems. With the help of industry and academic partners, Intel has made significant

Introducing Tunnel Falls

<https://www.intel.com/content/www/us/en/research/quantum-computing.html>

Zadnji dosežki

IBM

IBM Newsroom [News](#) [Media resources](#) [Inside IBM](#) [Blog](#)

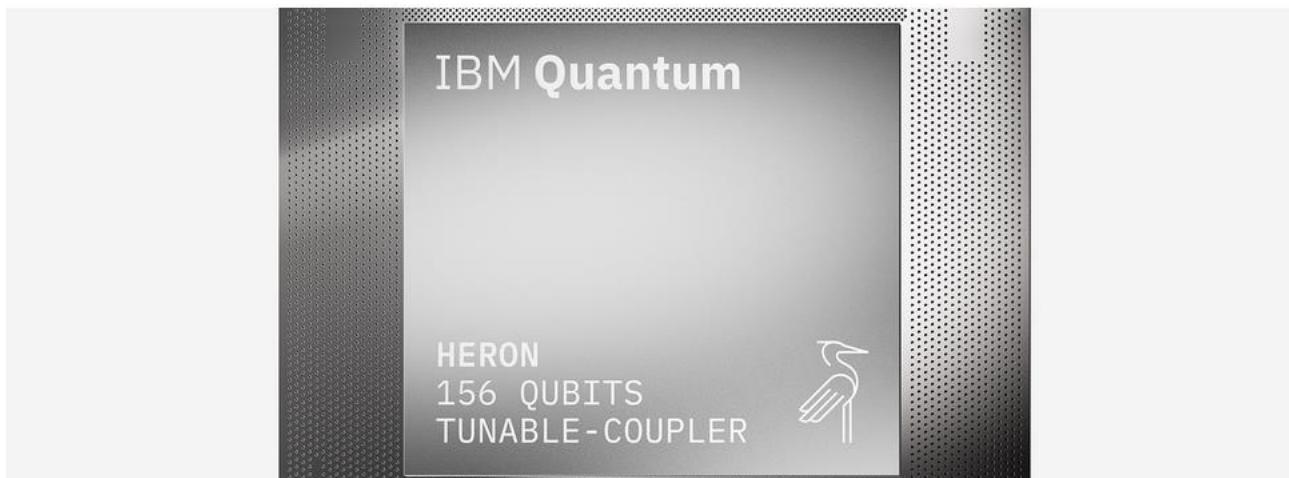
IBM Launches Its Most Advanced Quantum Computers, Fueling New Scientific Value and Progress towards Quantum Advantage

Qiskit, the world's most performant quantum software, can extend length and complexity of certain circuits to 5,000 two-qubit operations with accurate results on IBM quantum computers

RIKEN and Cleveland Clinic explore new, scientifically valuable problems by combining quantum and classical resources with Qiskit; Rensselaer Polytechnic Institute takes steps towards quantum-centric supercomputing

Qiskit services from IBM, Algorithmiq, Qedma, QunaSys, Q-CTRL, and Multiverse Computing to expand performance while simplifying how next-generation algorithms can be built

Nov 13, 2024



<https://newsroom.ibm.com/2024-11-13-ibm-launches-its-most-advanced-quantum-computers,-fueling-new-scientific-value-and-progress-towards-quantum-advantage>

Zadnji dosežki

NEW GUIDE: QUANTUM OPTIMIZATION FOR OPERATIONAL EXCELLENCE [DOWNLOAD THE GUIDE](#) 



INVESTORS

CAREERS

CONTACT

LOG IN



Products

Solutions

Sectors

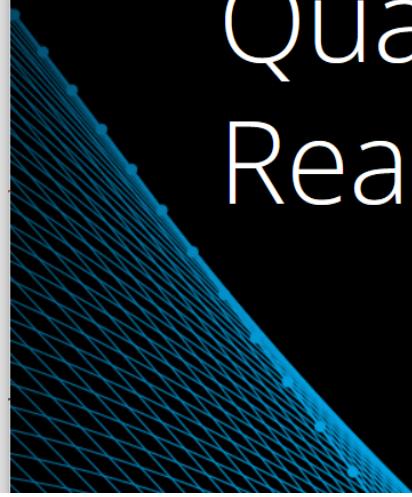
Learn

Build

Company

Get Started 

The Power of Quantum Computing Realized Today



Unlike other quantum systems that are years away from practical use, D-Wave's annealing quantum computing technology is ready for real-world applications today. Our

https://www.dwavesys.com/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=quantum_realized&gclid=CjwKCAiA5eC9BhAuEiwA3CKwQtZr4TSZwc4XxhI3CGwCRCMjrffxh-sWTSNkimXTMMcN6l0olwSpURoCSvoQAvD_BwE

Nekonvencionalne platforme procesiranja

- **kvantno** računalništvo (quantum computing)
- **nevromorfno** računalništvo (neuromorphic computing)
- **Mikro/nano** elektromehanski sistemi (micro/nano electromechanical systems – MEMS/NEMS)
- **DNK procesiranje** (DNA computing)
- **Optično procesiranje** (optical computing)
- **reakcijsko difuzijsko procesiranje** (reaction diffusion computing)

Obris snovi pri NNKR

- Kaj čutimo?
- Človeški možgani
- EEG, EMG in ostale slikovne tehnike
- Vmesniki možgani-stroj, mišice-stroj
- Analiza poglavitnih komponent
- Analiza neodvisnih komponent
- Nevromorfno procesiranje
- Revizija Turingovega stroja
- Uvod v kvanto računalništvo (ustroj sveta, verjetnosti in amplitude, kvantna "bizarnost", qubit...)
- Kriptografija in faktorizacija celih števil (RSA, Shor, postkvantna kriptografija)

Režim pri predmetu NNKR

- Študent lahko zbira točke z naslednjimi aktivnostmi:
 - preverjanja znanj pri predavanjih (do 500 točk, **min. 250**):
 - Dve vmesni preverjanji, vsako po 250 točk (minimum: skupno vsaj 50% torej vsaj 250 točk in vsako preverjanje vsaj 35% torej vsaj 87,5 točk), ali
 - Ustni izpit na dan izpitnega roka (do 500 točk, **min. 250**)
 - z domačimi in projektnimi nalogami in njihovimi zagovori (do 500 točk, **min. 250**)

Točke: ocena	Točke: ocena
[0-100): nzd (1)	[500-600): zd (6)
[100-200): nzd (2)	[600-700): db (7)
[200-300): nzd (3)	[700-800): pd (8)
[300-400) : nzd (4)	[800-900): pd (9)
[400-500): : nzd (5)	[900-1000): odl (10)

<https://vaje.um.si/vaje>

Prijava na sistem s pomočjo digitalne identitete UM
(ime.priimek@student.um.si)
preko LDAP strežnika Univerze v Mariboru

Uporabniško ime

Geslo

Alternativni možnosti prijave:

- prijava z digitalno identiteto UM preko AD FS strežnika
- prijava z lokalnim geslom

Pripombe in vprašanja glede sistema lahko naslovite na [upravljalca sistema](#) ali na izvajalca predmeta.

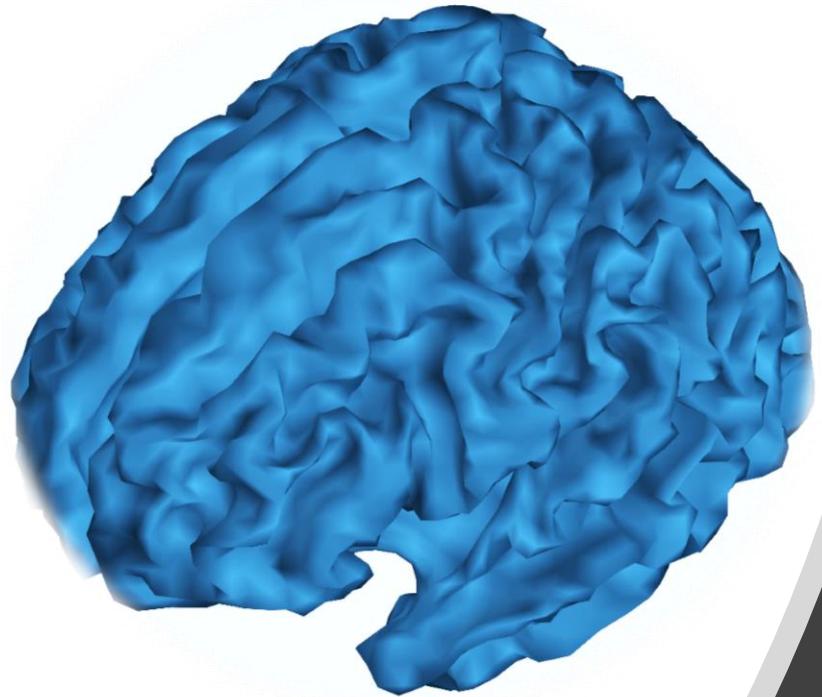
[Zasebnost in piškotki](#)

PREDVIDENI TERMINI KOLOKVIJEV

**(dokončen seznam bo objavljen na spletni
strani inštituta)**

1. kolokvij: torek, 15. 4. 2025, 12.00-14.00

2. kolokvij: torek, 10. 6. 2025, 12.00-14.00



Centralni živčni sistem

The human brain is an incredible
pattern-matching machine

Jeff Bezos

Spletišče SiNAPSA

<https://sinapsa.org>

Spletišče SiNAPSA

za radovedne

Poljudne vsebine za obiskovalce vseh starosti

za strokovnjake

Obvestila za raziskovalce in strokovnjake

za medije

Informacije za predstavnike medijev

teden možganov

Mednarodna akcija posvečena možganom

SiNAPSA eNevron

Portal za nevroznanstveno pošto

eSiNAPSA

Spletна revija za znanstvenike, strokovjake in nevroznanstvene navdušence

SiNAPSA srečanja

Mednarodna nevroznanstvena srečanja

Za možgane

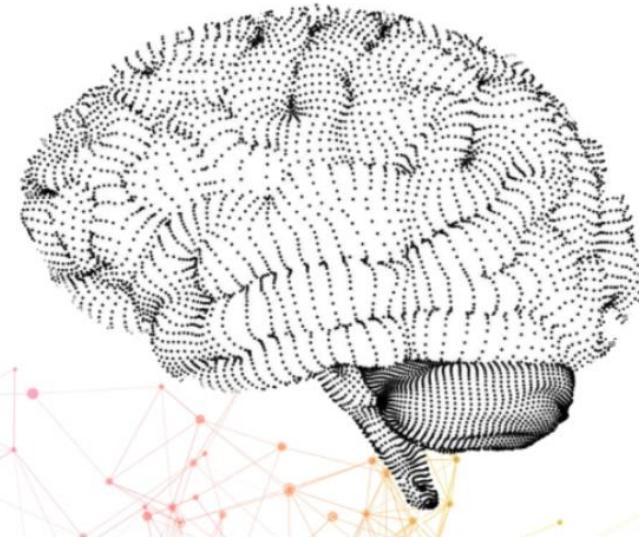
Vseslovenska akcija namenjena napredku nevroznanosti in skrbi za možgane

for international visitors

SiNAPSA pages in English

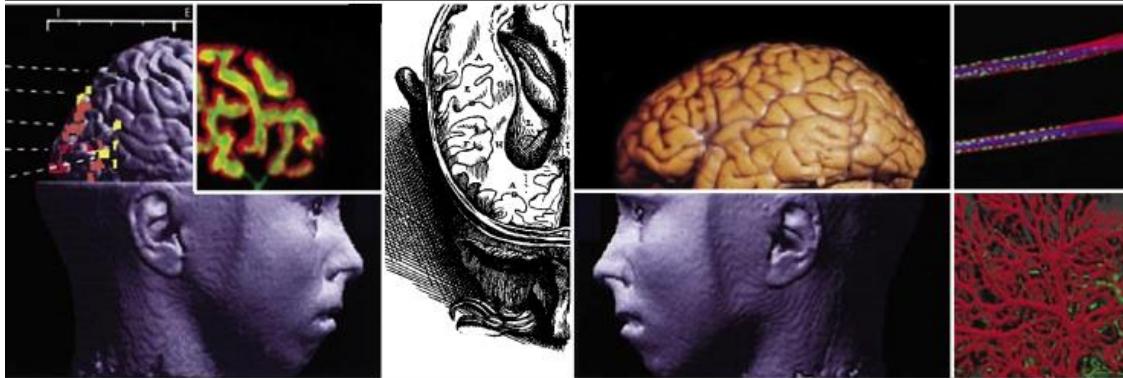
SiNAPSA

SiNAPSA, Slovensko društvo za nevroznanost, povezuje nevroznanstvenike v Sloveniji in svetu v znanstveno-raziskovalne projekte ter izobražuje javnost o delovanju živčevja v zdravju in bolezni, pomenu raziskovanja živčevja in uporabi znanja za kakovostno življenje posameznika in družbe.



SiNAPSA je prenovila svoje spletišče. Razkrili ga bomo ob koncu januarja 2025.

PRVI KORAKI V



NEVROZNANOST ZNANOST O MOŽGANIH

učni material v slovenščini

<http://www.sinapsa.org/radovedni/media/priponke/a317-Nevroznost-2014.pdf>

<http://www.sinapsa.org/>

Webinar: Promoting gender equality in science. Held Online, **February 26th 2024**.

Summer school: Hybrid Neural Interfaces. Held in Maribor, from **july 8th to july 12th 2024**.



<https://www.hybridneuro.feri.um.si/>

Hybrid neuroscience based on cerebral and muscular information for motor rehabilitation and neuromuscular disorders

What are Hybrid Neural Interfaces?

For complete understanding of the neurophysiology of human movement, motor learning, motor recovery and rehabilitation the activities of brain centers need to be analyzed simultaneously with the activity of muscles. Hybrid Neural interfaces combine the information from both recording modalities.

Why HybridNeuro project?

HybridNeuro project combines the expertise of leading European partners in the field of Neural Interfaces to set up a new pathways of analyzing human motor system and human movements and transfer the academic research into clinical and industrial practice.

More about HybridNeuro

<https://www.hybridneuro.feri.um.si/>



Blue
Brain
Project

Blue Brain Project

<https://www.youtube.com/watch?v=LS3wMC2BpxU>



Anil Seth: Your brain hallucinates your conscious reality

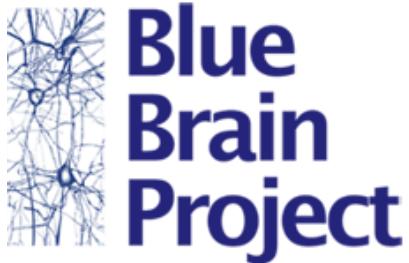
<https://www.youtube.com/watch?v=lyu7v7nWzfo>



Anil Seth: Your brain hallucinates your conscious reality

<https://www.youtube.com/watch?v=lyu7v7nWzfo>





How do neurons connect to each others? Blue Brain Project opens new insights.

<https://www.youtube.com/watch?v=ySgmZOTkQA8>

Scientists discover hidden patterns of brain activity.

<https://www.youtube.com/watch?v=ZQTqvv6HHY>

Blue Brain Project.

<https://www.youtube.com/watch?v=Tzj0gt7czXA>



HarvardX

1. Experiences Build Brain Architecture

<https://www.youtube.com/watch?v=VNNsN9IJkws>

How a synapse works

<https://www.youtube.com/watch?v=OvVI8rOEncE>

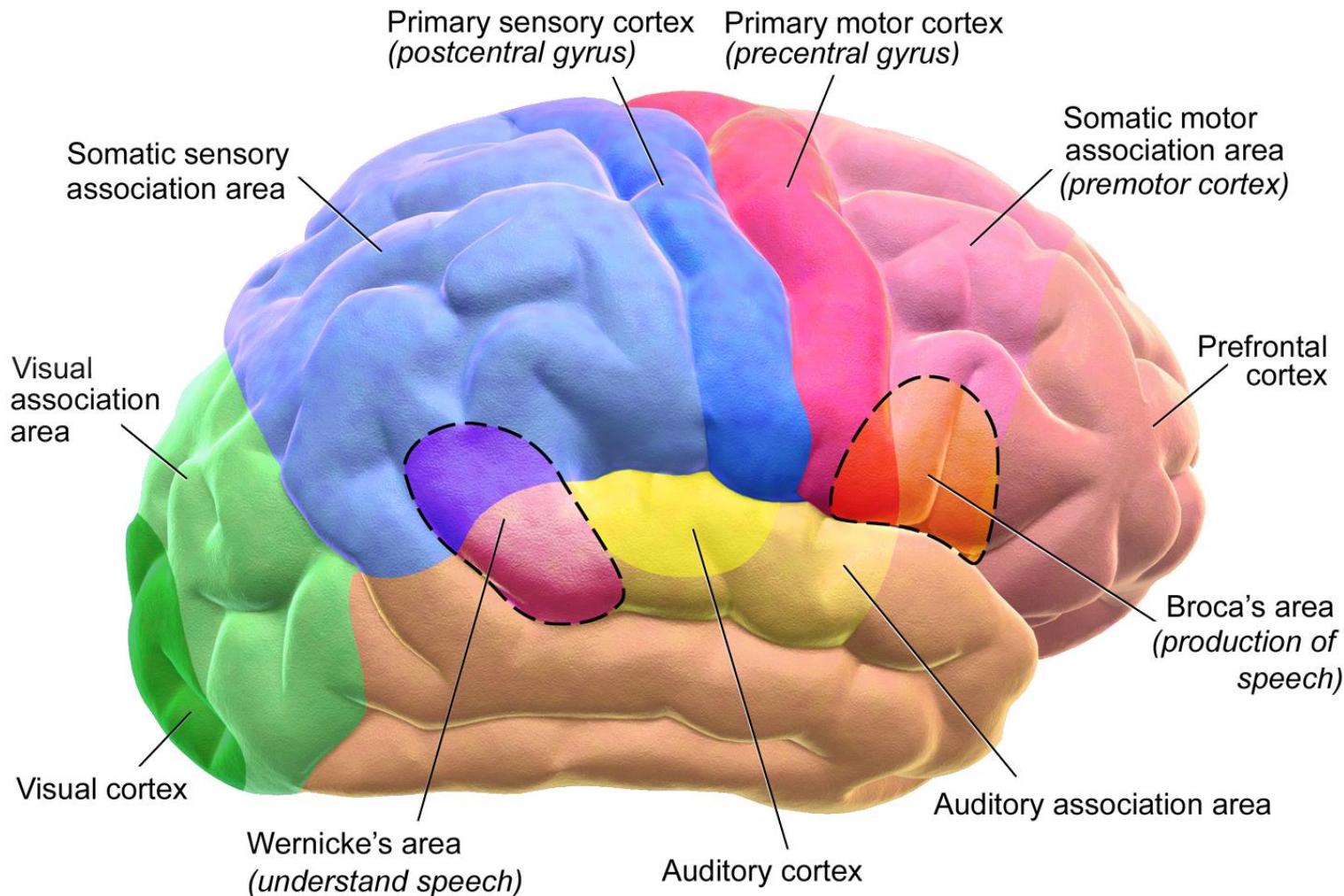
Blue Gene

500 TFLOPS



Vir: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IBM_Blue_Gene_P_supercomputer.jpg

Funkcionalnosti možganske skorje



Blausen.com staff (2014). "[Medical gallery of Blausen Medical 2014](#)". *WikiJournal of Medicine* 1 (2). DOI:[10.15347/wjm/2014.010](https://doi.org/10.15347/wjm/2014.010). ISSN 2002-4436

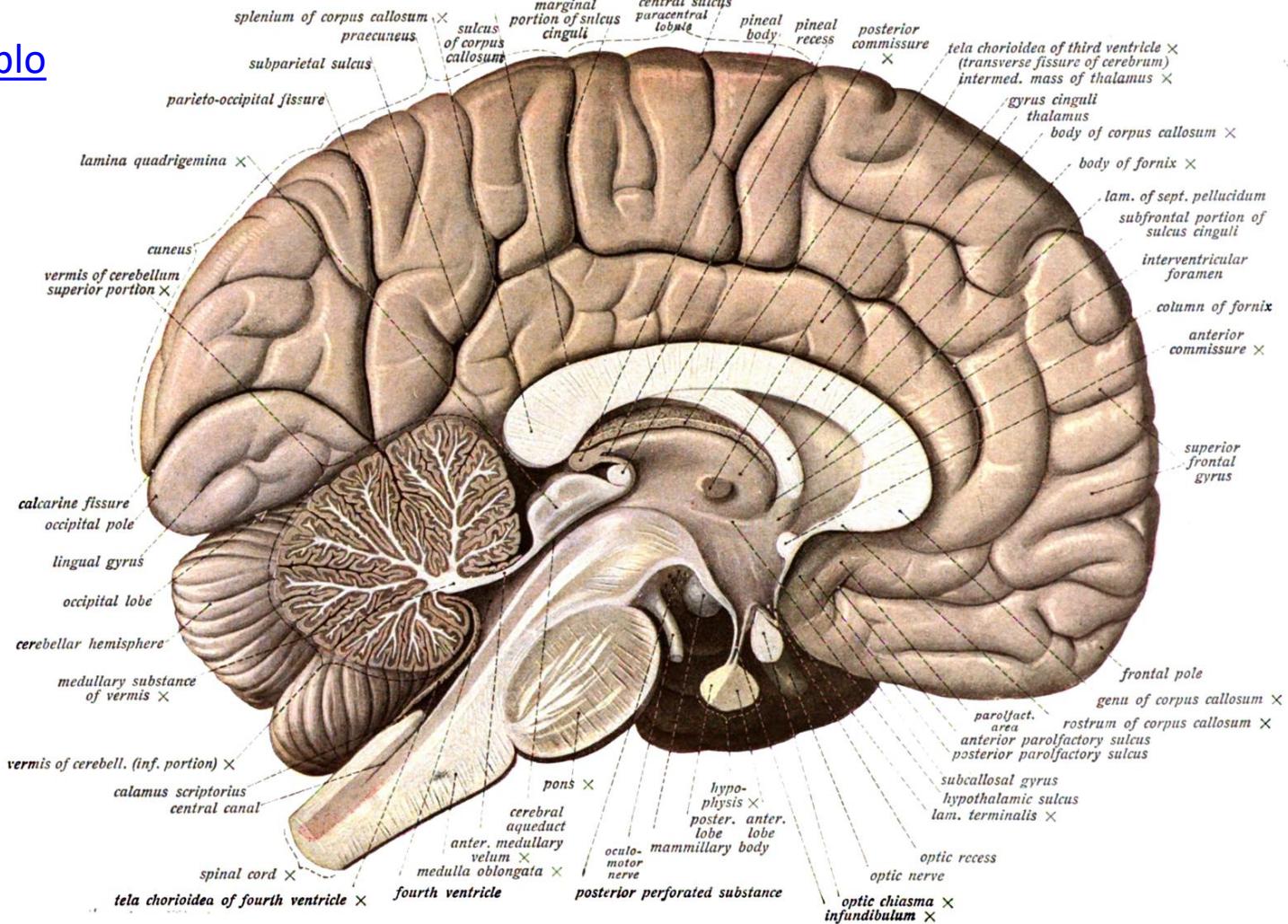
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blausen_0102_Brain_Motor%26Sensory_\(flipped\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blausen_0102_Brain_Motor%26Sensory_(flipped).png)

Anatomija možganov

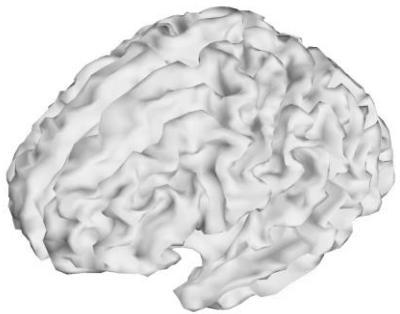
https://sl.wikipedia.org/wiki/človeški_možgani

- [4.1 Veliki možgani](#)
- [4.2 Mali možgani](#)
- [4.3 Možgansko deblo](#)

Nadaljne branje:
Rok Merc,
[ORGANIZACIJA MOŽGANOV IN PSIHOLOŠKI VIDIK TRAVMATIČNE MOŽGANSKE POŠKODBE](#), Zavod za varstvo in rehabilitacijo po poškodbi glave Zarja



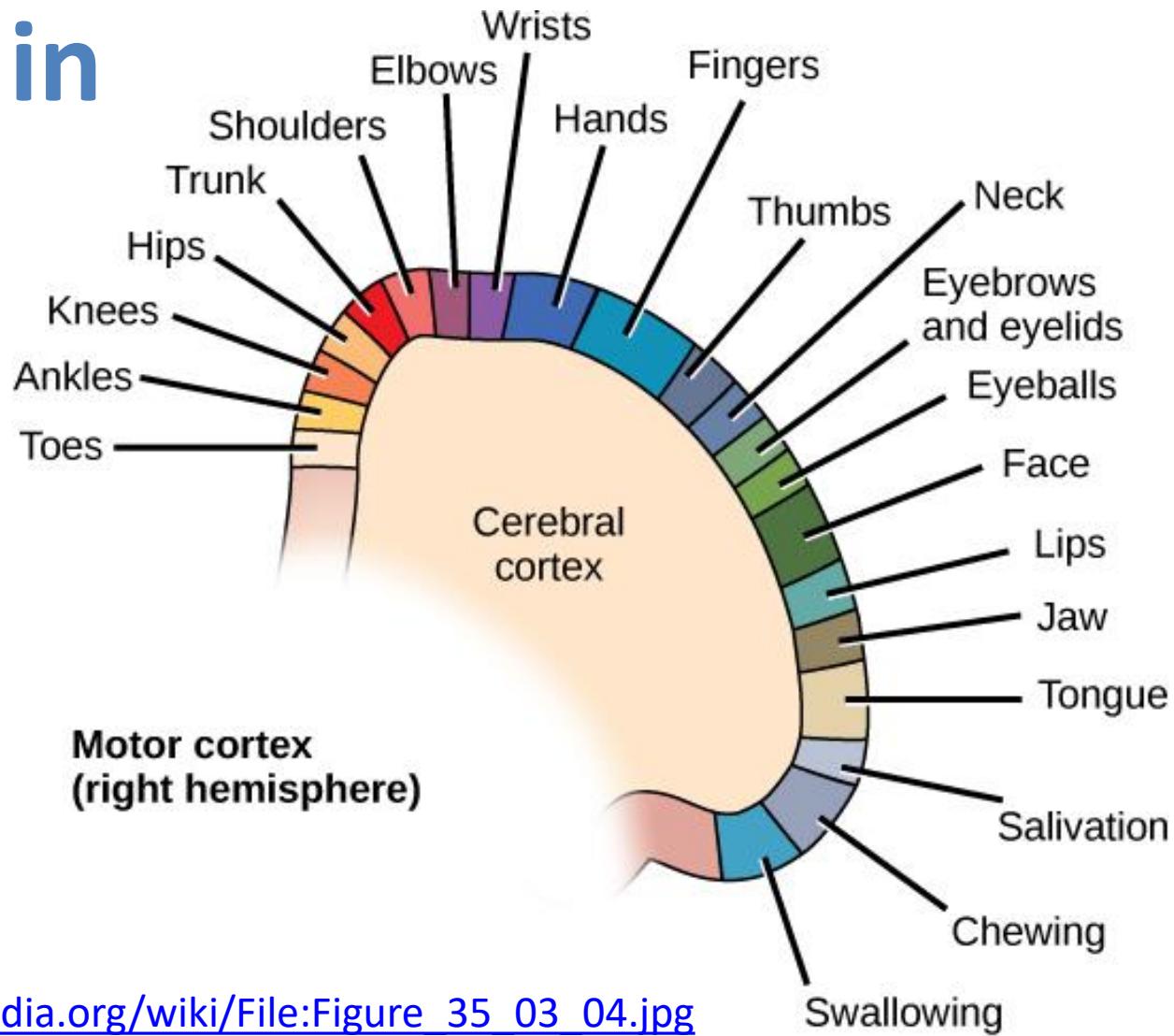
Vir: Atlas and Text-book of Human Anatomy Volume III Vascular System, Lymphatic system, Nervous system and Sense Organs <https://en.wikipedia.org/wiki/Neuroanatomy>



MOŽGANSKA SKORJA

Kortikalno področje	Dejavnost
Prefrontalni kortex	Reševanje problemov, Kompleksno mišljenje
Motorični asociacijski kortex	Koordinacija kompleksnih gibov
Primarni motorični kortex	Začenjenje hotenih gibov
Primarni Somatosenzorični kortex	Sprejemanje čutnih informacij iz telesa
Senzorično Asociacijsko področje	Procesiranje večsenzoričnih informacij
Vidno asociacijsko področje	Compleksno procesiranje vidnih informacij
Vidni korteks	Detekcija enostavnih vidnih dražljajev
Wernicke-jevo področje	Razumevanje govora
Slušno asociacijsko področje	Kompleksno procesiranje zvočnih informacij
Slušni korteks	Detekcija zvočnih kvalitet (ton, intenziteta)
Center za govor (področje Broca)	Artikulacija in produkcija govora

Motorični in senzorični korteks



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Figure_35_03_04.jpg

Čutila niso enakomerno porazdeljena po telesu:

<https://blog.cabraresearch.org/meet-cortex-man-how-your-brain-sees-your-body>

Human Connectome Project

 [Home](#) [About](#) [Data](#) [Informatics](#) [Gallery](#) [Publications](#) [News](#)

The Human Connectome Project

Navigate the brain in a way that was never before possible; fly through major brain pathways, compare essential circuits, zoom into a region to explore the cells that comprise it, and the functions that depend on it.

The Human Connectome Project aims to provide an unparalleled compilation of neural data, an interface to graphically navigate this data and the opportunity to achieve never before realized conclusions about the living human brain.

[Download Data](#)

Laboratory of Neuro Imaging

News

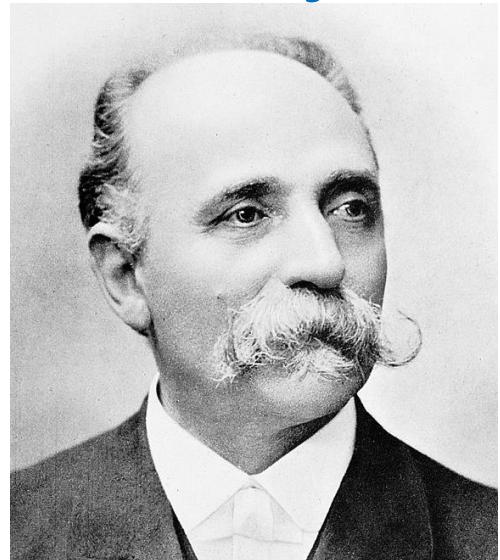
[RSS News](#)

National Geographic features the Human Connectome Project

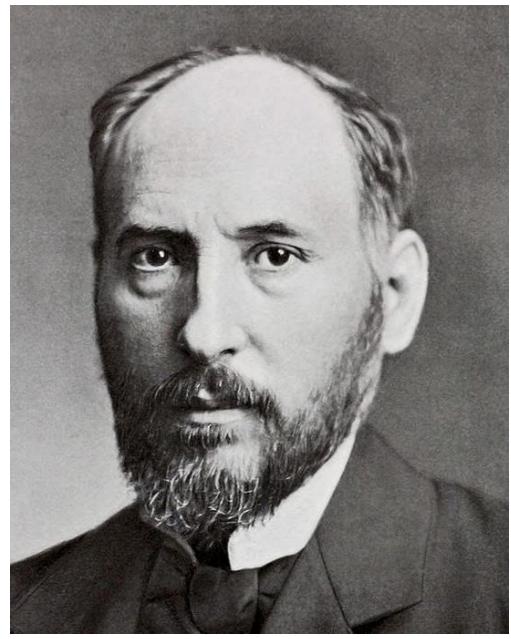
New research from members of our HCP team suggests that brain circuitry is organized more like Manhattan's street grid than London's chaotic tangle of random roadways. Read the full article in the February 2014 issue of National Geographic.

- <http://www.humanconnectomeproject.org/>

informacijska tehnologija: doktrina nevronov

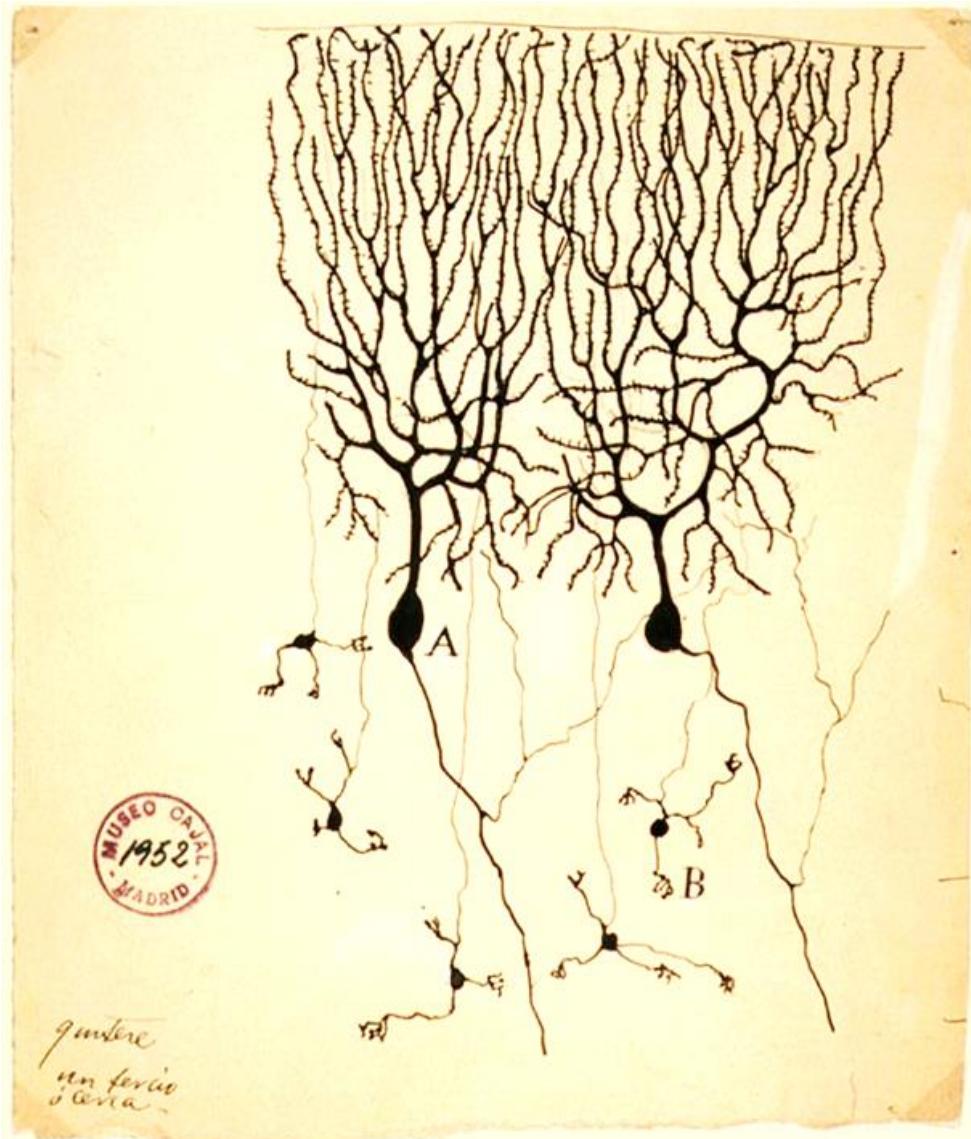


Camillo Golgi, 1843-1926



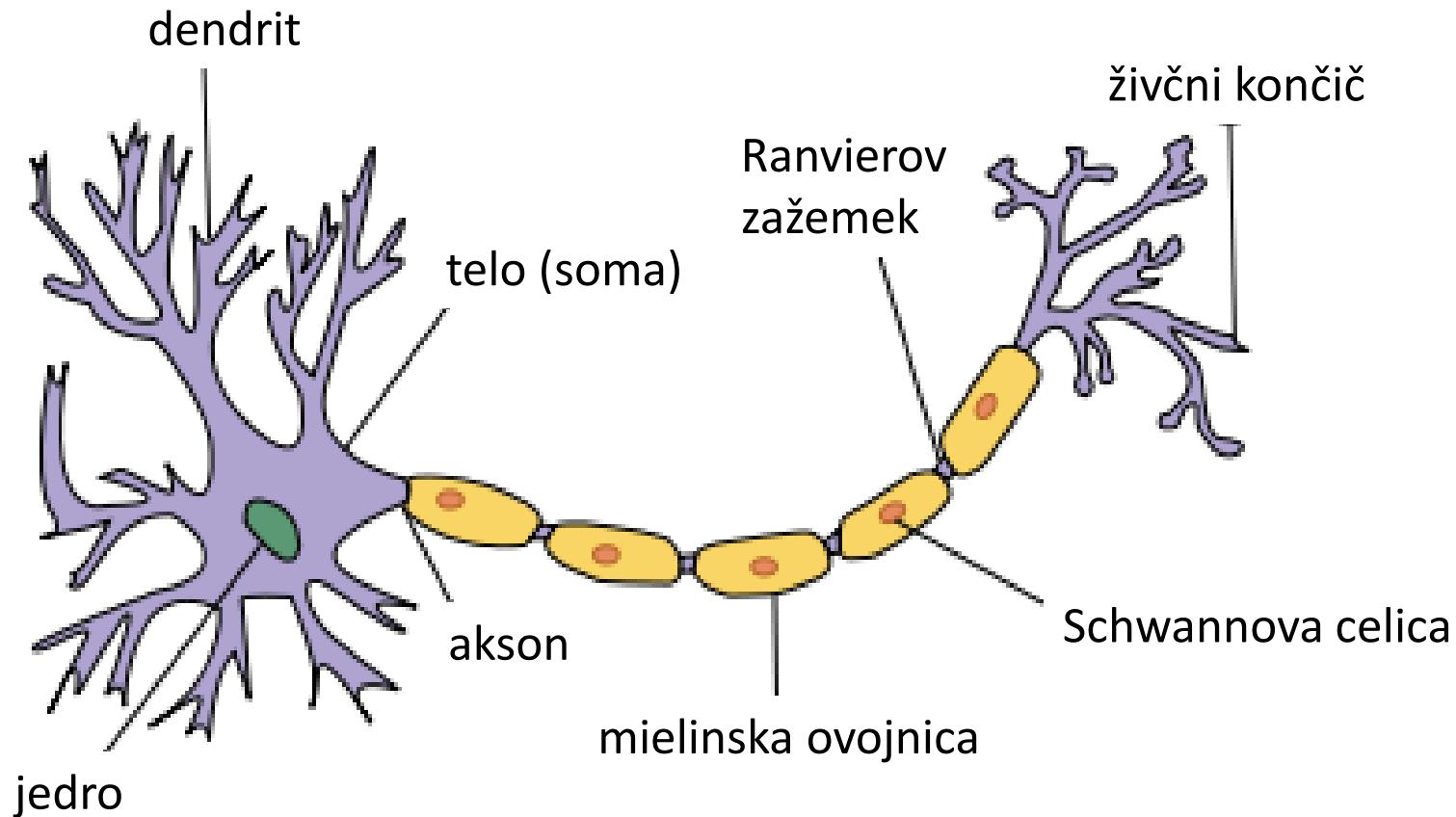
Santiago Ramón y Cajal 1852-1934

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cajal-Restored.jpg>



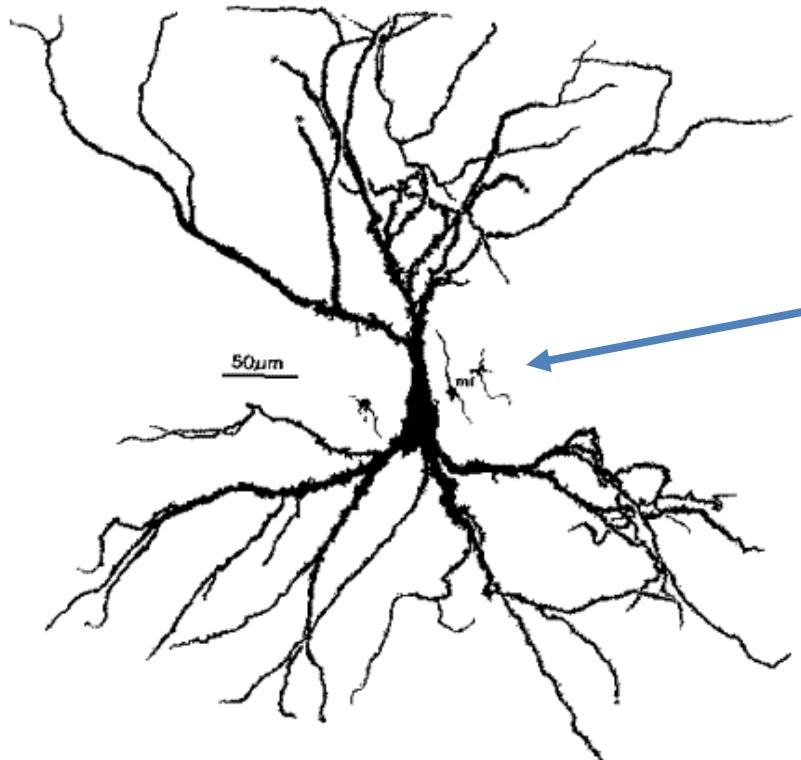
Purkinje cells (A) and granule cells (B) from pigeon cerebellum by Santiago Ramón y Cajal, 1899. Instituto Santiago Ramón y Cajal, Madrid, Spain
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PurkinjeCell.jpg>

Nevroni



Vir: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neuron_Hand-tuned.svg

Nevroni



Motorični nevron: ima telo v centralnem živčevju. Akson je v živcu, ki vodi v efektorje, končiči pa so povezani z efektorskimi celicami (žlezne ali mišične celice).

Senzorični nevron: povezuje čutila s centralnim živčevjem – dovodna vlakna.

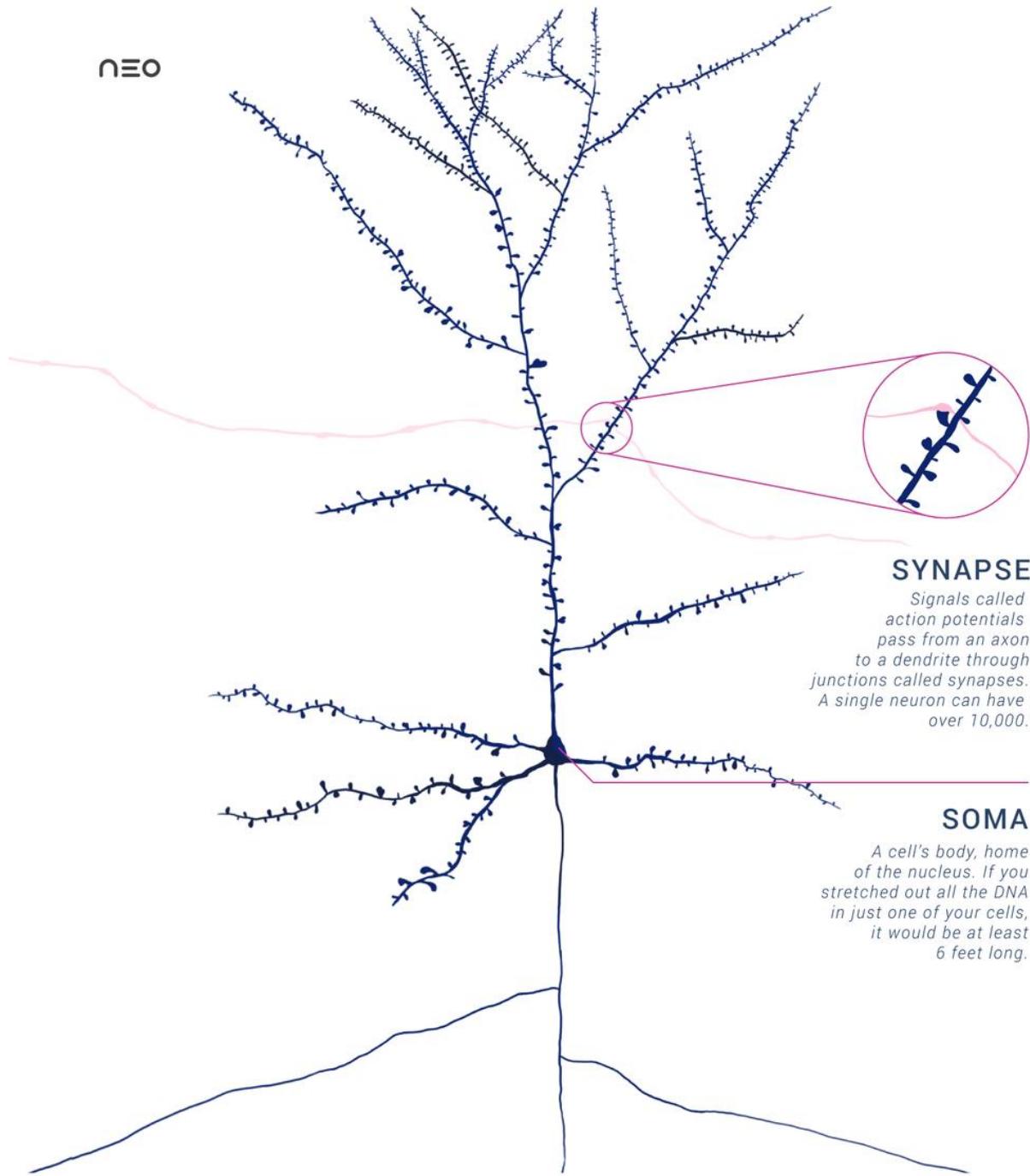
Piramidne celice: tipični nevroni v možganih. Sestavlja jo celično telo, ki je piramidne oblike in razvejana struktura dendritov, ki v premeru meri ~2 mm. Informacije se pretakajo preko bazalnih dendritov, apikalni dendrit pa služi za nastavljanje pragovne funkcije . Med seboj lahko tvorijo veliko število kontaktov. Te povezave omogočajo funkcioniranje možganov.

Celice Glia: so pomožne celice v centralnem živčevju. Dajejo oporo živčnim celicam, jih prehranjujejo

vir:<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hippocampal-pyramidal-cell.png>

David Beeman from <http://www.brains-minds-media.org/archive/218/>

NEO



NEURON ANATOMY

DENDRITES

Signals come in through dendrites. These vast, tree-like branches grow up and out from the soma. Dendrites are thicker than axons and covered in synapses.

AXON

Signals go out through axons, which branch many times and stretch vast distances. Neurons send action potentials down their axons and through synapses they've formed to communicate with other cells. The longest axons in your body reach from your toes to your spine.

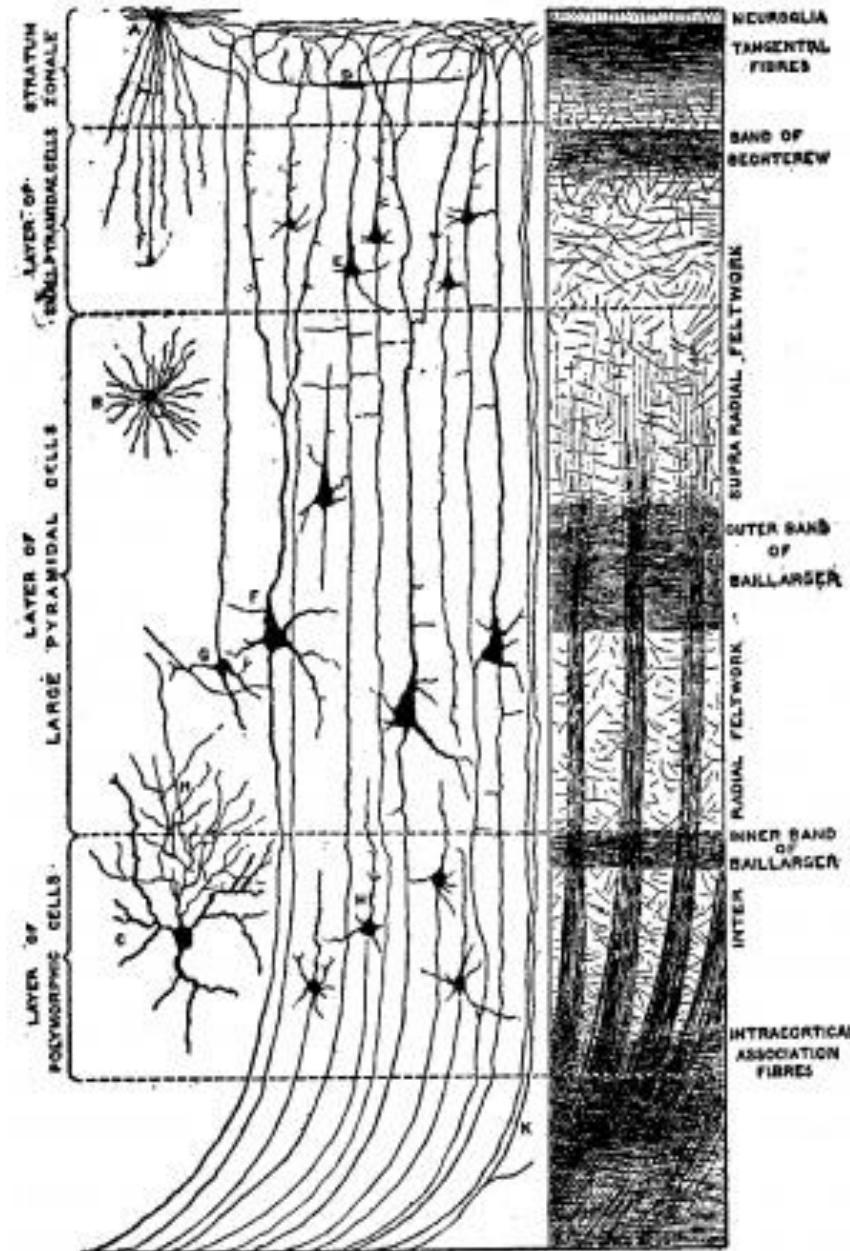
Vir:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_of_a_Neuron
with_Synapse.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_of_a_Neuron_with_Synapse.png)

Struktura korteksa

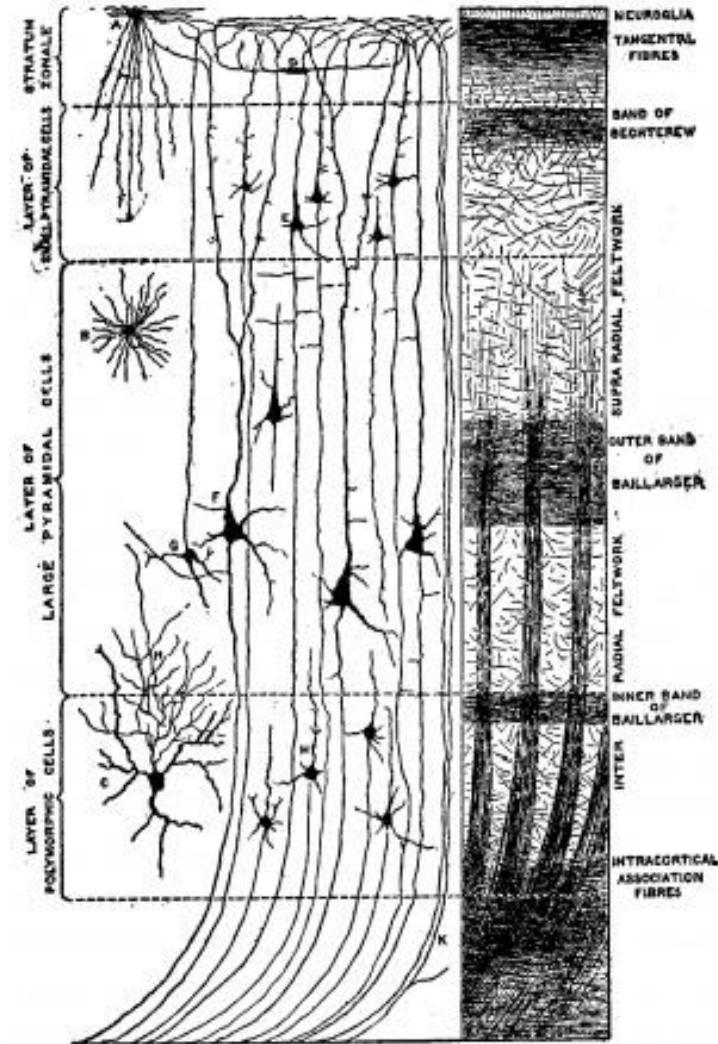
Neokorteks sestavlja 6 različnih plasti:

- I Zunanja molekularna plast
- II Zunanja granularna celična plast
- III Zunanja piramidalna celična plast
- IV Notranja granularna celična plast
- V Notranja piramidalna celična plast
- VI Raznolika (multiformna) plast



Zunanja molekularna plast (Molecular layer)

- Apikalni dendriti piramidnih nevronov (prilagoditev praga piramidnih nevronov)
- Celice glia (pomožne celice v centralnem živčevju. Dajejo oporo živčnim celicam, jih prehranjujejo)
- nekaj teles nevronov
- izmenjava lokalnih informacij

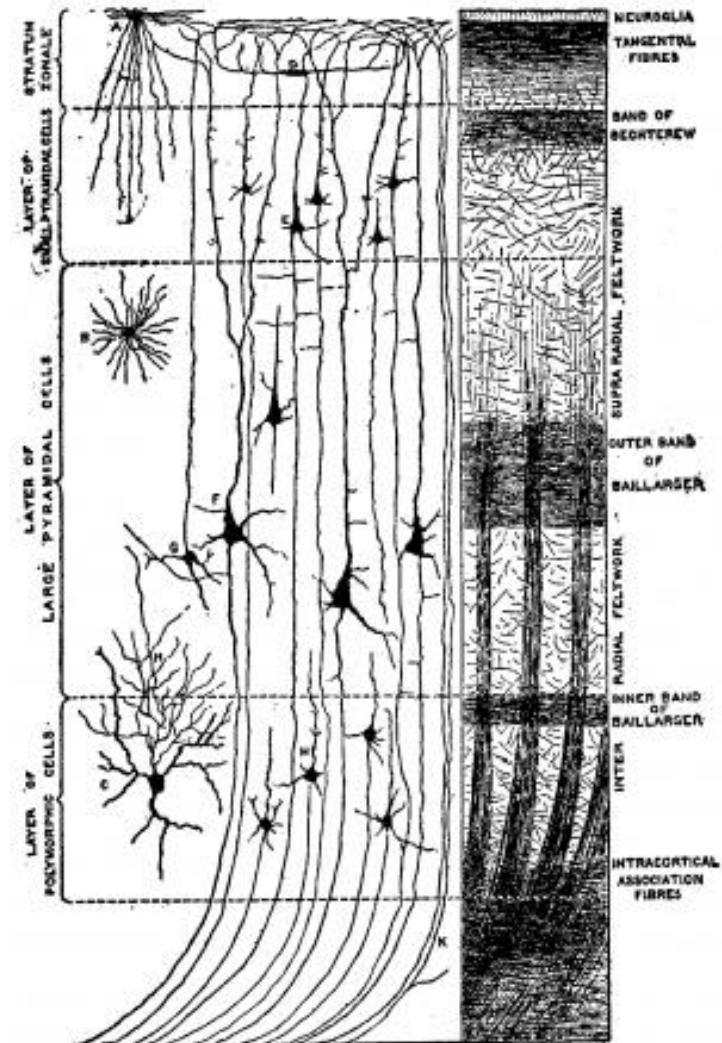


Zunanja granularna in piramidalna plast (Cortex Structure Layer II/ III)

II zunanja granularna celična plast (External granular layer)

III zunanja piramidalna celična plast (External pyramidal layer)

- Medkortična izmenjava informacij:
 - Aferentna (dovodna) vlakna iz ostalih predelov kortexa
 - Odvodna vlakna (k isti in sosednji hemisferi kortexa) zapuščajo to plast (in stopajo vanjo na ciljni destinaciji)

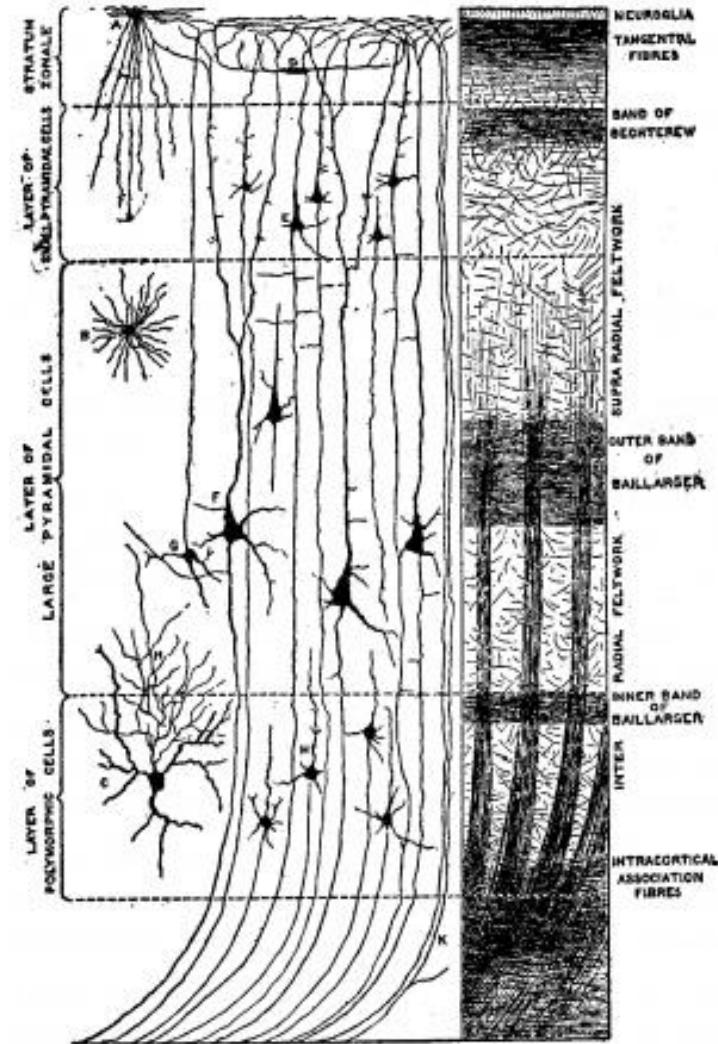


Interna granularna plast

(Cortex Structure Layer IV)

IV Interna granularna plast (Internal granular layer)

- Aferentna vlakna iz Talamusa
- številne in kompleksne sinaptične povezave
- ta plast je specializirana za sprejem informacij (dobro razvita v senzoričnem korteksu)

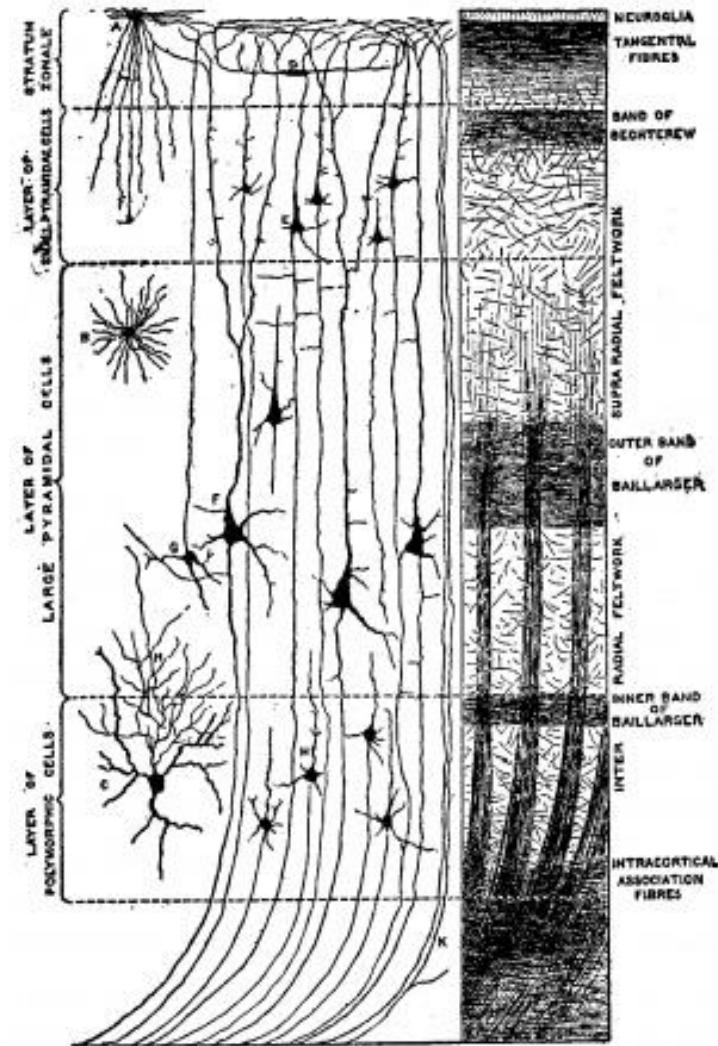


Interna piramidalna plast

(Internal pyramidal layer)

V Interna piramidalna plast (Internal pyramidal layer)

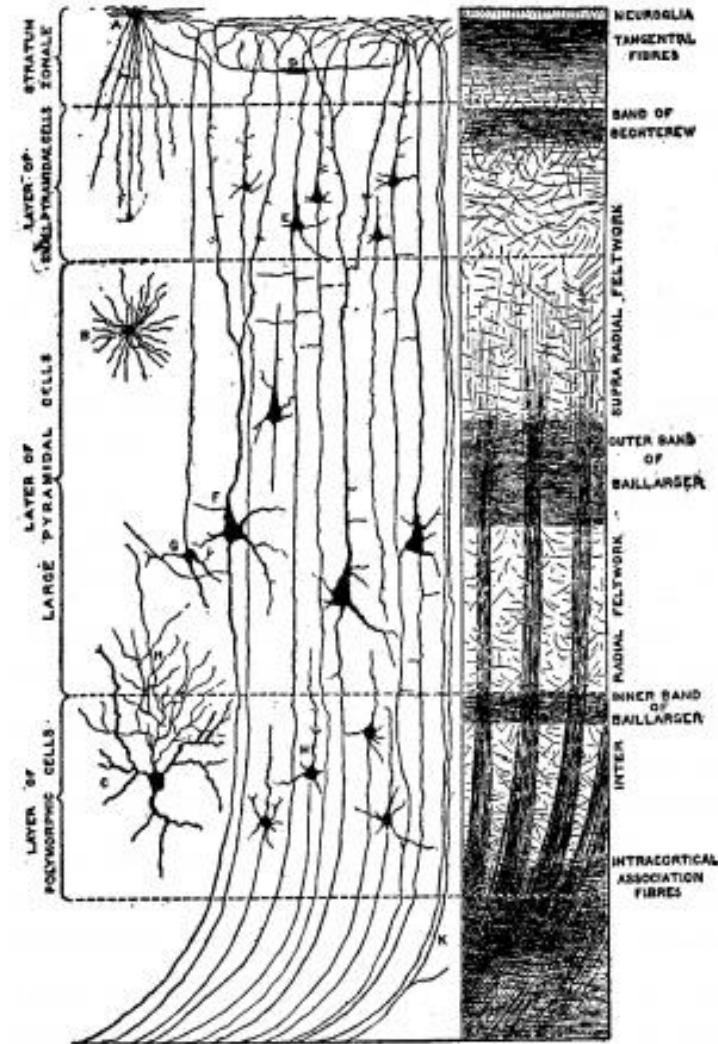
- velike piramidalne celice
- Projekcije (izhodne povezave) v podtalamična območja možganov
 - Bazalni gangliji
 - možgansko deblo
 - hrbtenjača
- Izhodna informacijska plast (dobro razvita predvsem v motoričnem korteksu)



Raznolika plast (Multiform layer)

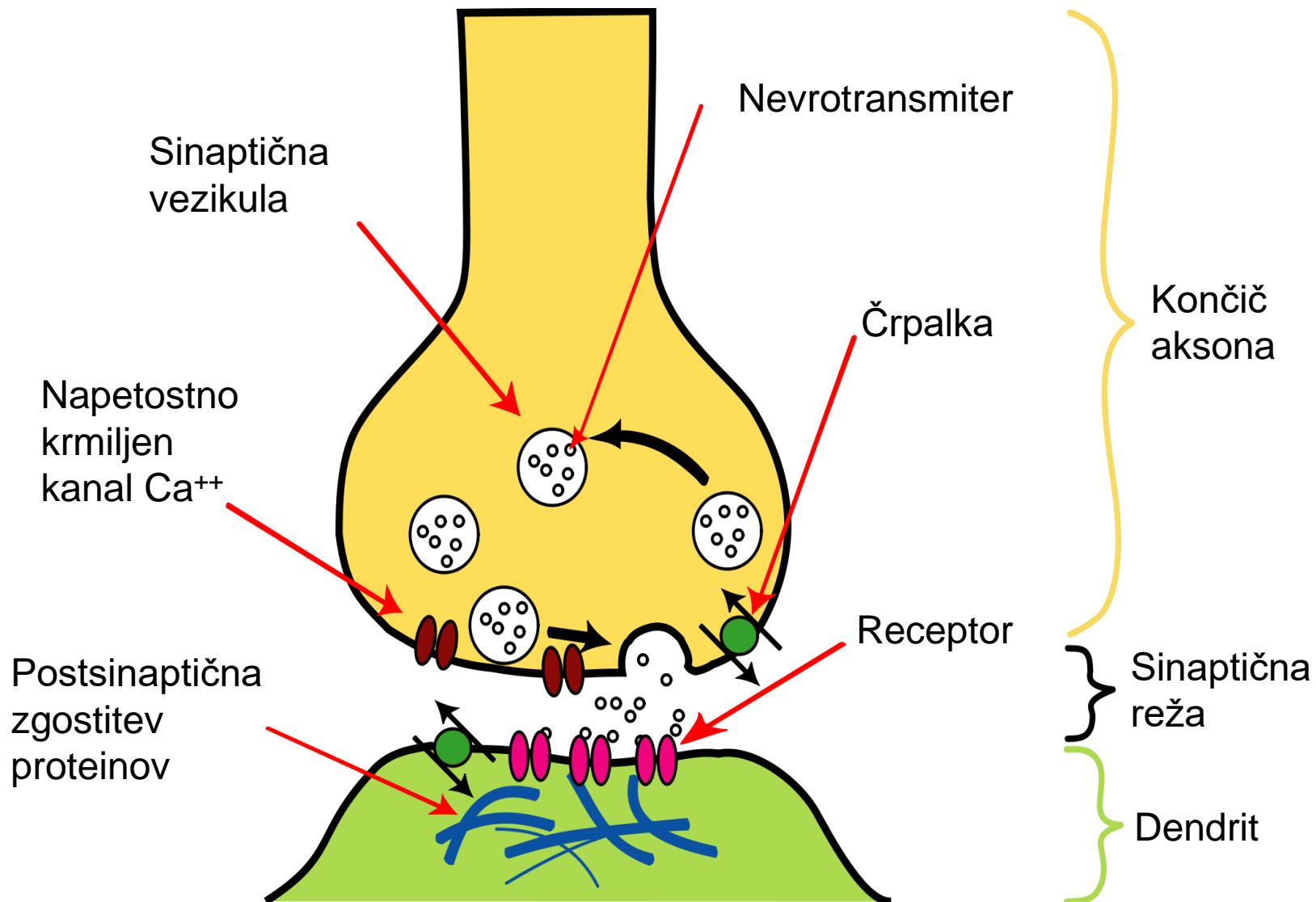
VI raznolika plast (Multiform layer)

- Nevroni različnih oblik
- meji na belino
- Kortikotalamična izmenjava informacij



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Minute_structure_of_the_cerebral_cortex.jpg

Sinapsa



Nevrotransmiterji

Receptorji na nevronih:

- Ionotropični (ionotropic receptor): sprejem ionov in električna ekscitacija...
- Metabotropični (metabotropic receptor): uravnavanje metabolizma nevrona, ki vpliva tudi na njegovo električno delovanje

Živčne prenašalci (neurotransmitter)

- ekscitatorni (vzburjevalni): npr. glutamat
- inhibitorni (zavorni): npr. γ -aminomaslena kislina (GABA)

Nevrotransmiterji

Ekscitatorni ionotropni:

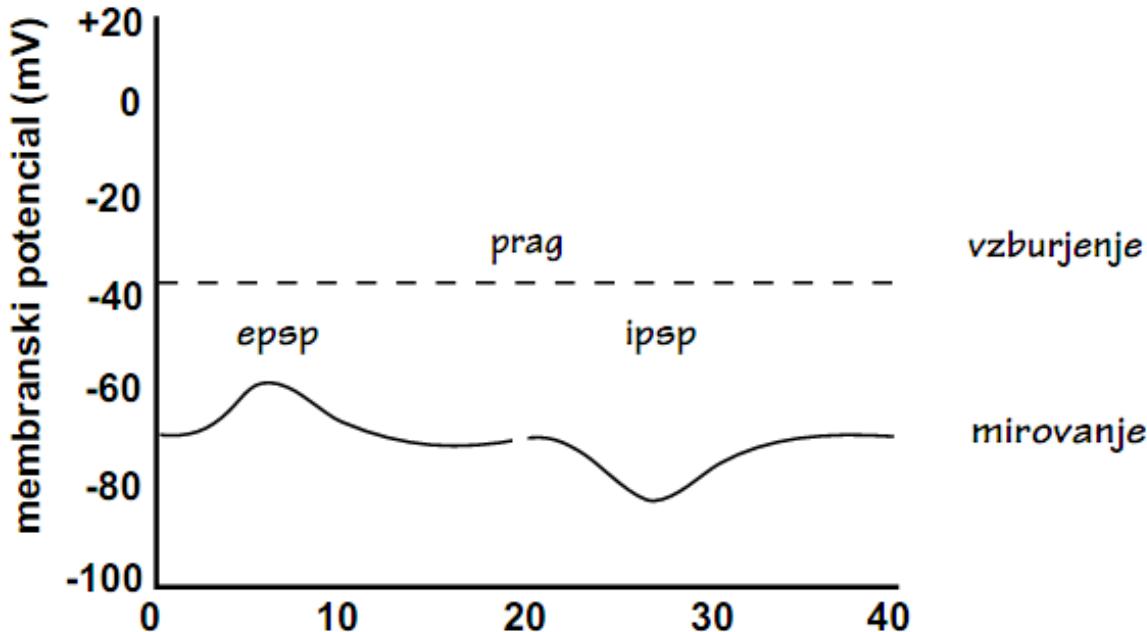
- *glutamat*

Inhibicijski ionotropni:

- *GABA*
- *glicin*

Metabotropni:

- *acetilholin*
- *dopamin*
- *noradrenalin*

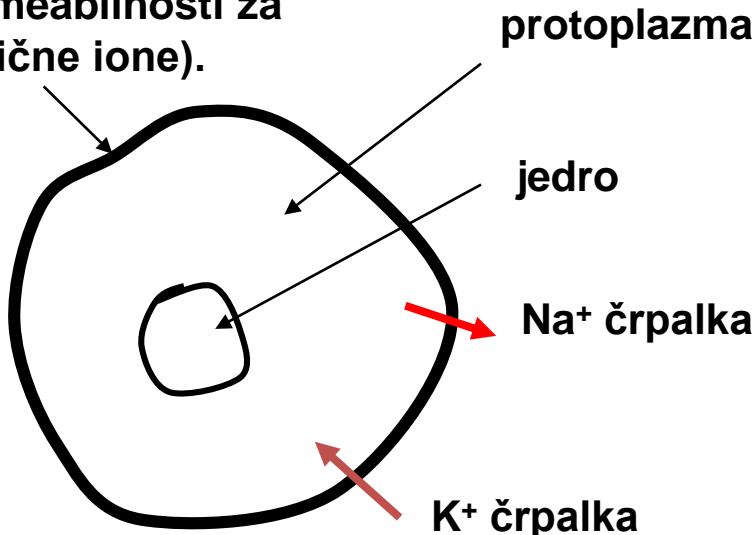


Ekscitatorni postsinaptični potencial (epsp) je sprememba membranskega potenciala iz -70 mV na vrednost, bližjo 0 mV .

Inhibitorni postsinaptični potencial (ipsp) ima nasprotni učinek.

Električna aktivnost celice

Membrana je permeabilna za vodo in ione (različne permeabilnosti za različne ione).



Analogna električna vezja:

Aktivne črpalke: generatorji toka

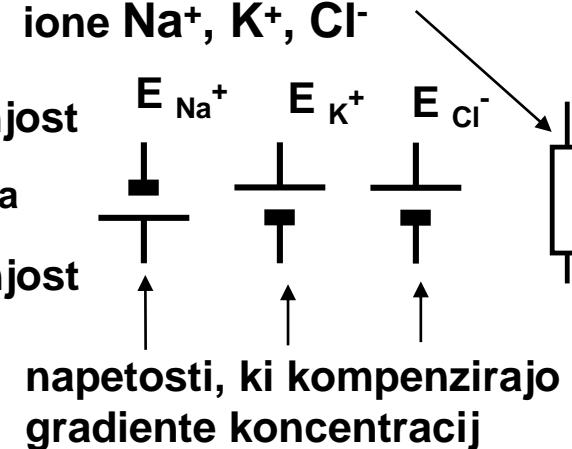
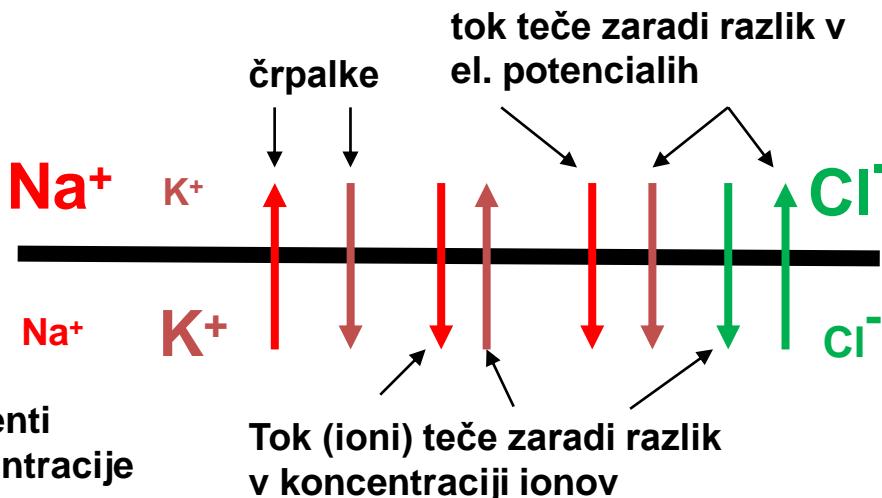
Permeabilnost: električna prevodnost

Gradienti koncentracije: električna polja,

Glavni ioni: Na^+ , K^+ , Cl^-

Čezmembranska napetost se stabilizira pri $\sim 70 \text{ mV}$, pri čemer je notranjost celice – in zunanjost +. Pri tej napetosti je vsota pretokov ionov enak nič.

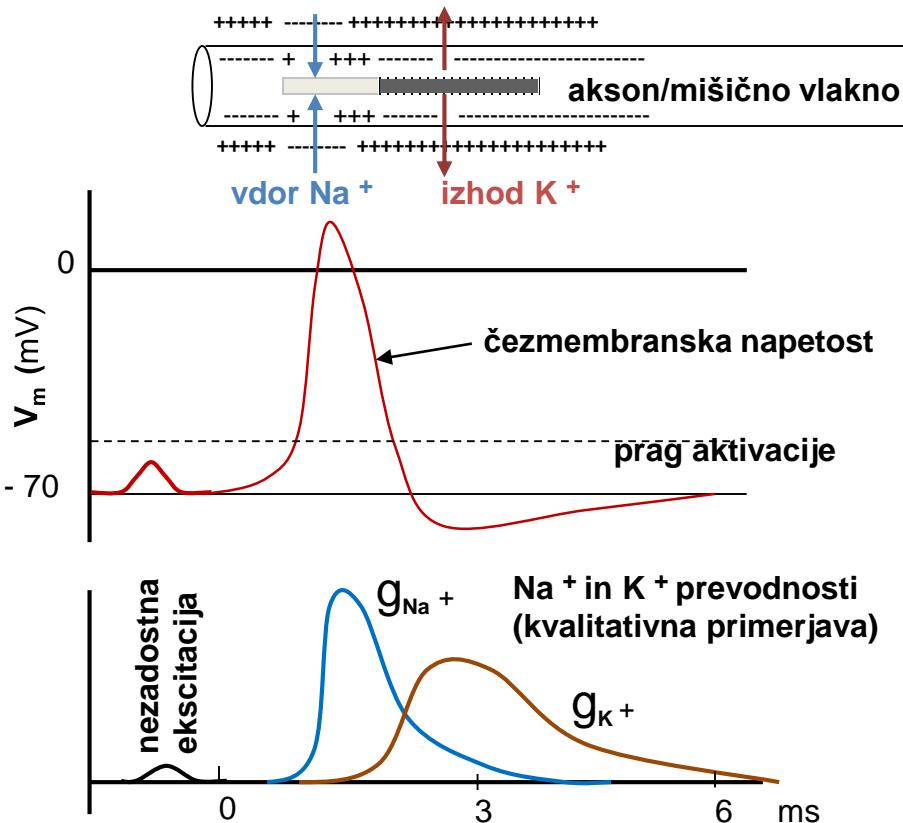
Električna prevodnost je ekvivalent permeabilnosti za ione Na^+ , K^+ , Cl^-



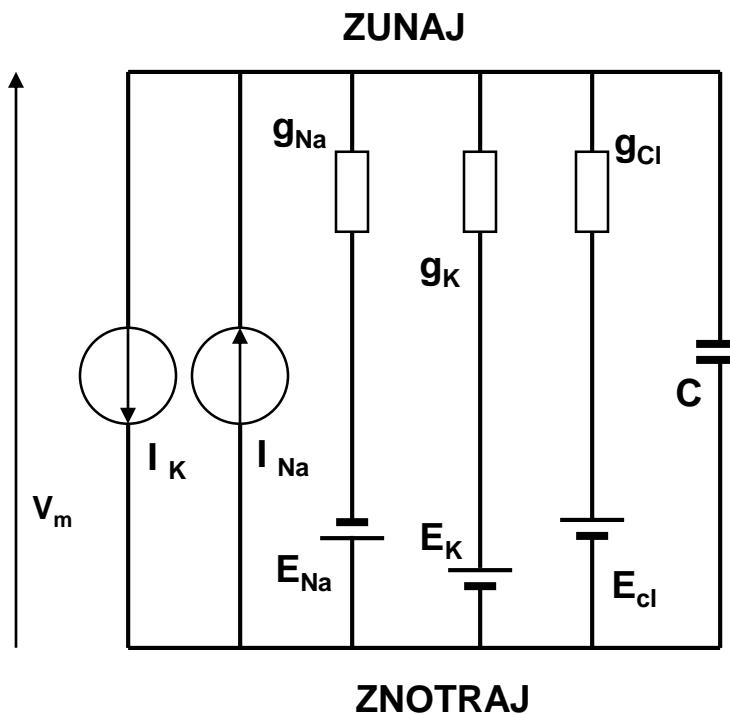
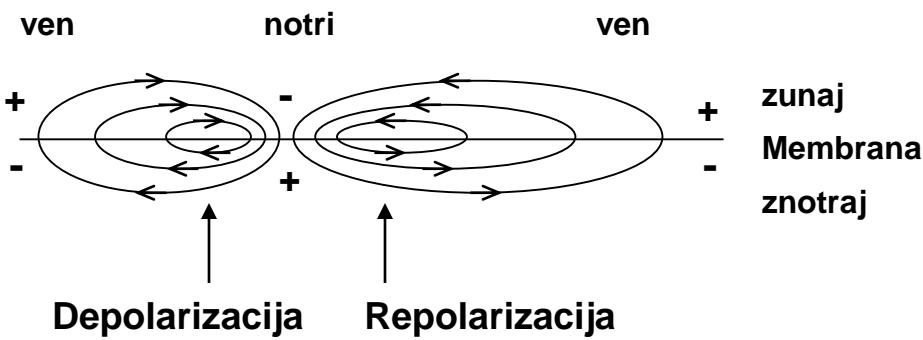
Celična membrana

- Celična membrana je semipermeabilna. Je bolj permeabilna za določene substance kot za druge.
- Njena debelina je med $75 \div 100 \text{ \AA} = 7.5 - 10.0 \text{ nm}$ (1 Angstrom = 0,1 nm), zgrajena pa je iz molekul proteinov (debeline 30 Å), dvojnega sloja polariziranih maščobnih molekul (debeline 35 Å) in zunanjega sloja proteinskih molekul (debeline 30 Å).
- Pore so namenske, vsaka za specifične ione (Ca, Na, K itd.). Njihov premer znaša 8 Å. Odpiranje in zapiranje por (in s tem permeabilnost) sta odvisna od napetosti na membrani in prisotnosti specifičnih substanc v okolini pore.
- Mirovna membranska napetost je okoli 70 mV. Notranjost celice je negativno nabita, zunanjost pozitivno.
- Delček membrane lahko ekvivalentno opišemo z nelinearnim električnim vezjem, ki ga opisuje **Hodgkin-Huxley**-ev model.

model Hodgkin-Huxley (celica HH)



Tok preko membrane



V_m = čezmembranska napetost

C = kapacitivnost membrane

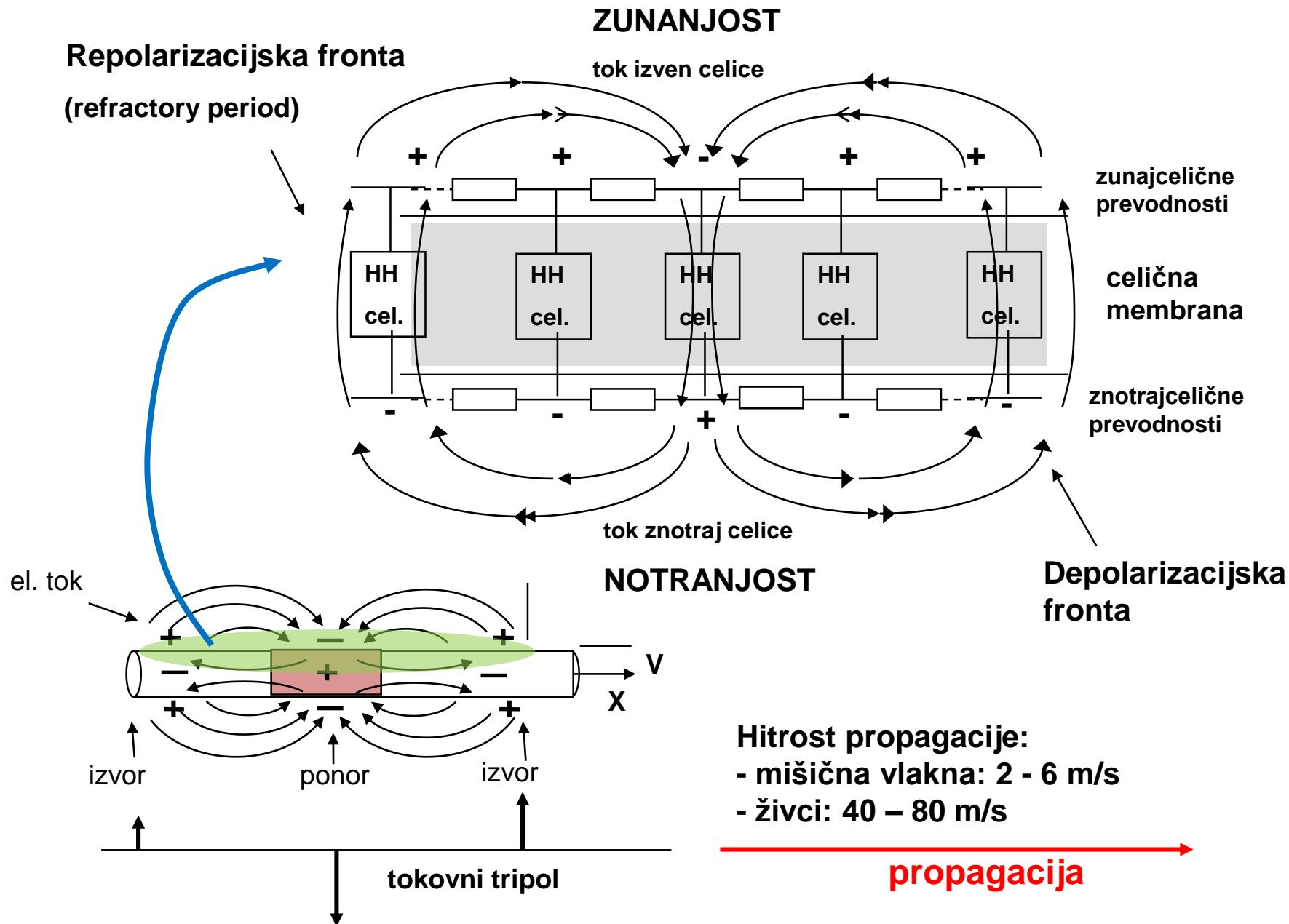
g_{Na} = prevodnost Na kanalov, $g_{\text{Na}} = g_1(V_m, t)$

g_K = prevodnost K kanalov, $g_K = g_2(V_m, t)$

g_{Cl} = prevodnost Cl kanalov, $g_{\text{Cl}} = g_3(V_m, t)$

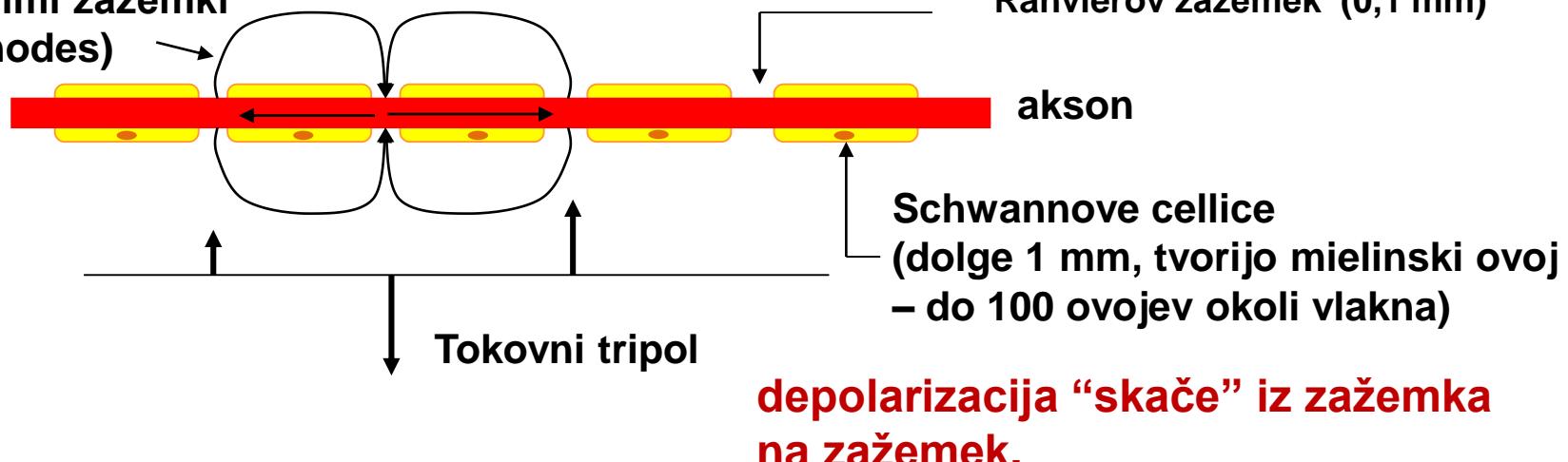
I_K, I_{Na} - tokovi aktivnih črpalk

Propagacija akcijskega potenciala po aksonu/vlaknu



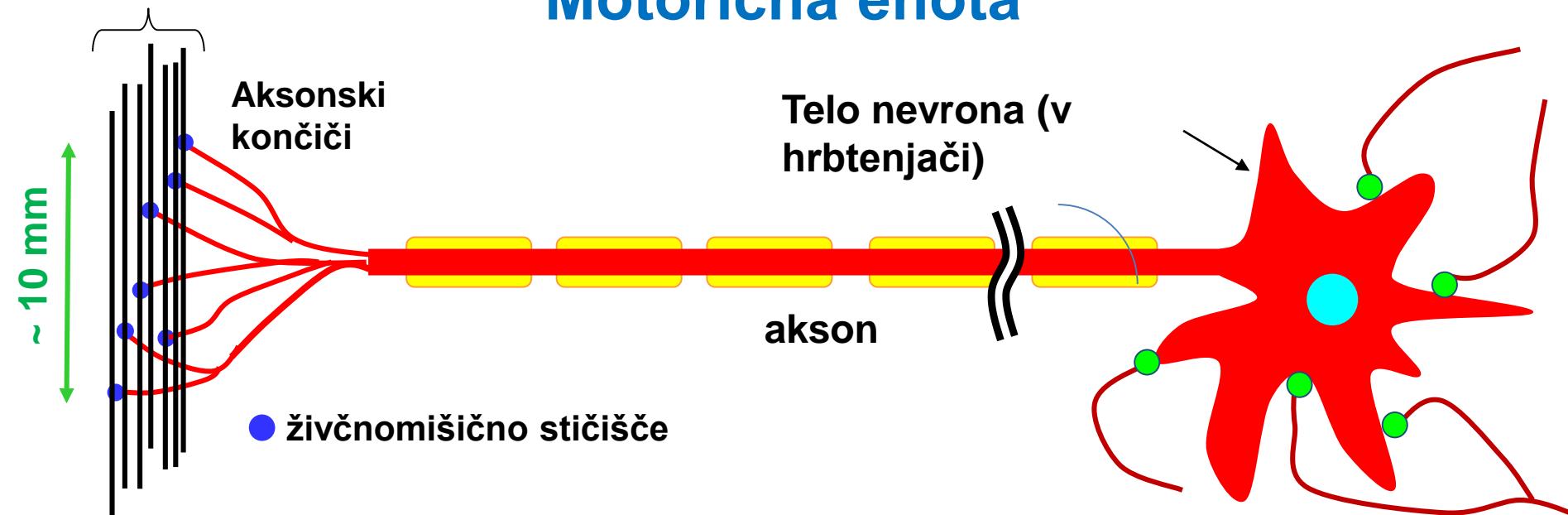
Živčna vlakna imajo mielinsko ovojnicu

Tok teče le med
Ranvierovimi zažemki
(Ranvier nodes)



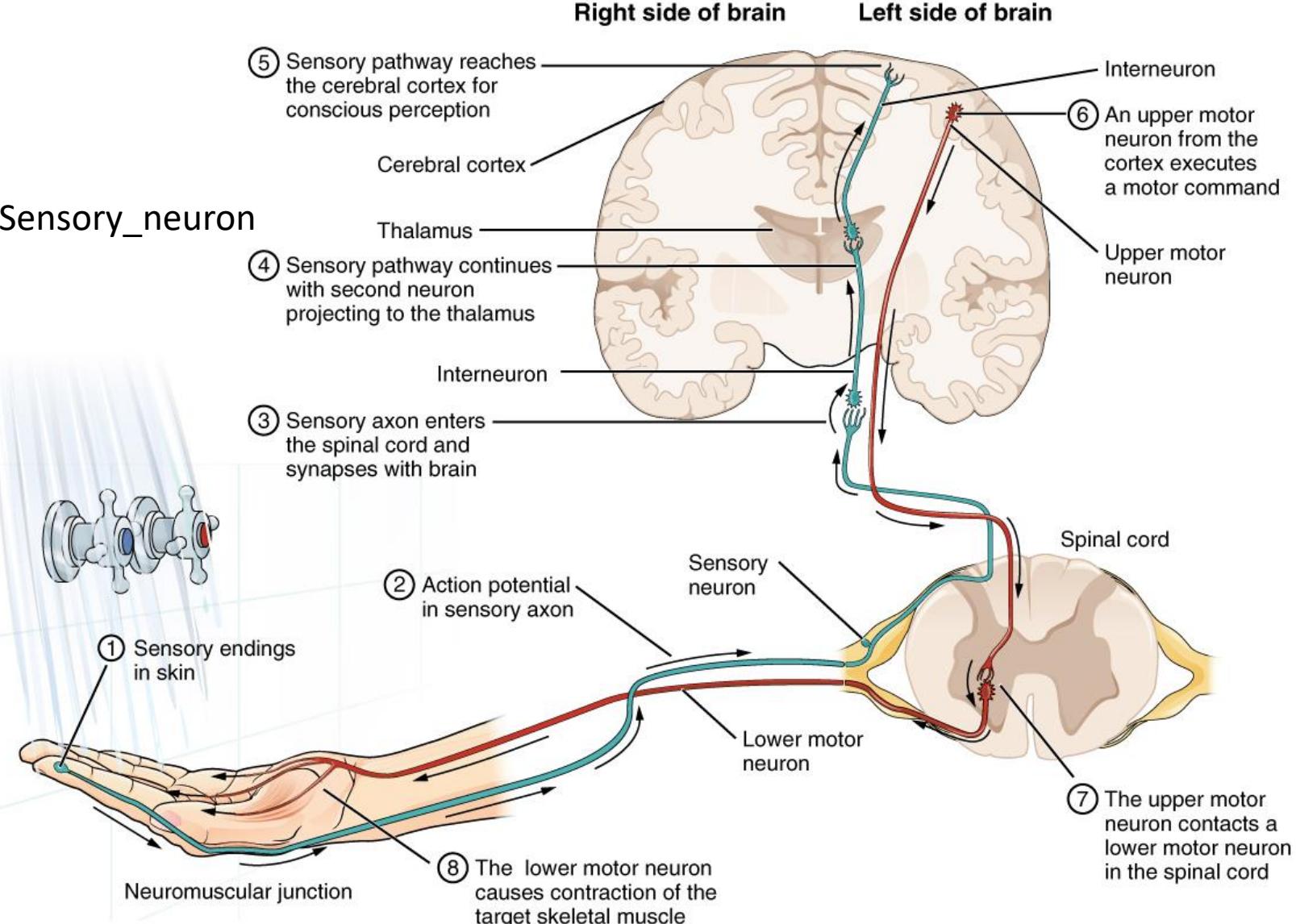
Mišična
vlakna

Motorična enota



Senzorični sistem pri ljudeh

org/wiki/Sensory_neuron



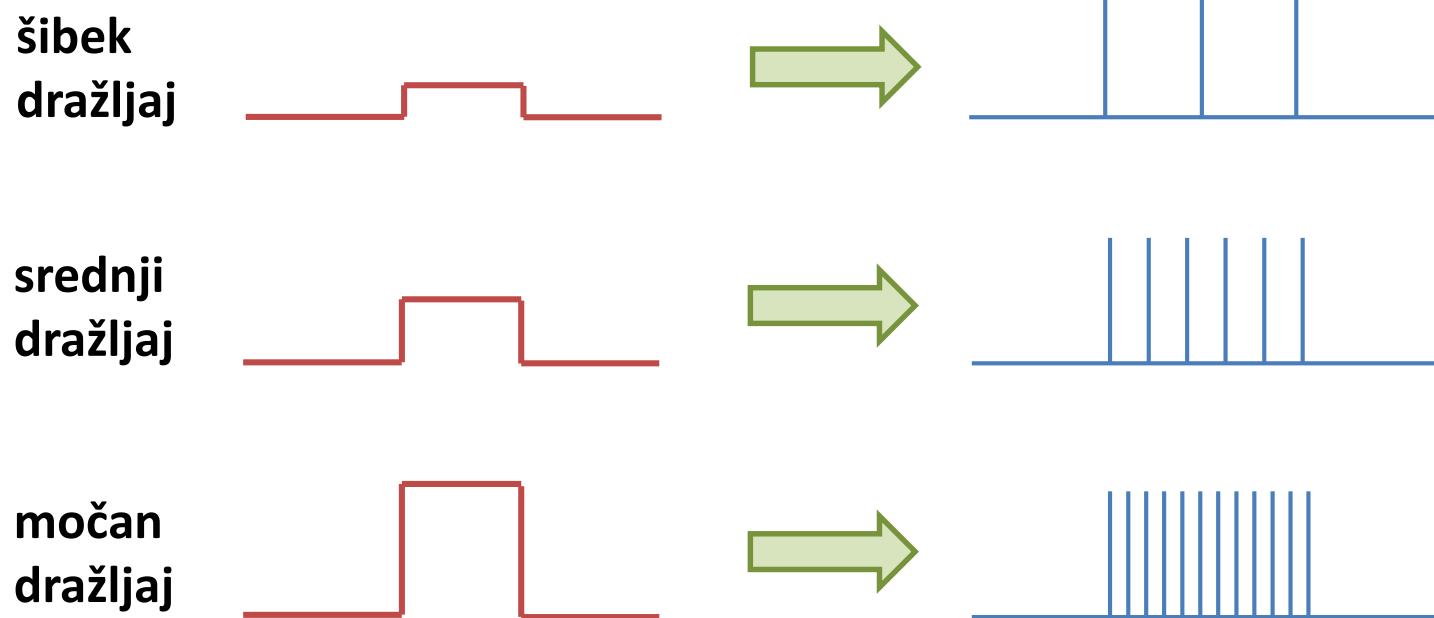
Vir: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1212_Sensory_Neuron_Test_Water.jpg

<https://cnx.org/contents/FPtK1zmh@8.25:fEI3C8Ot@10/Preface>

Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks

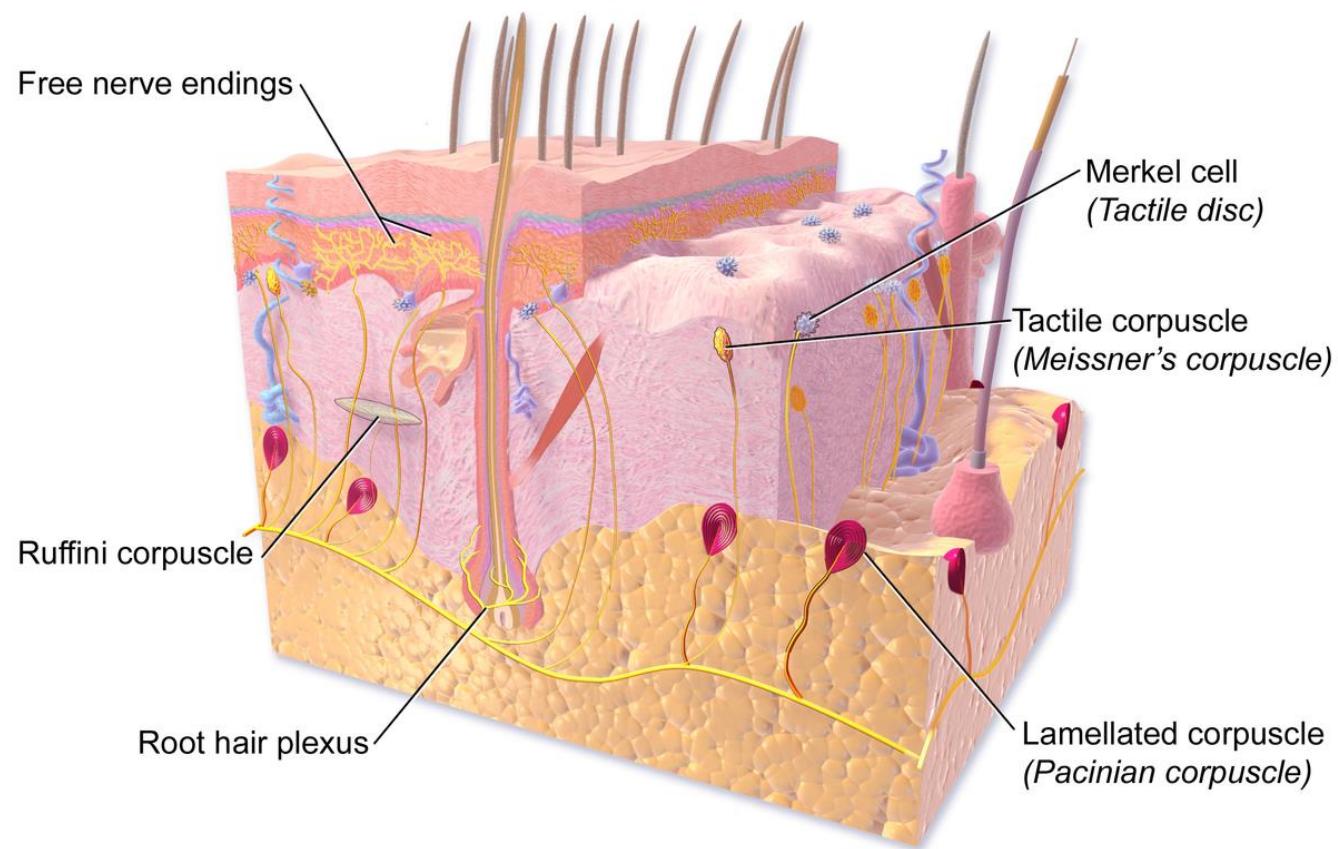
Roland S. Johansson* and J. Randall Flanagan†

"Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks"
(PDF). *Nature Reviews. Neuroscience.* **10** (5): 345–59. [doi:10.1038/nrn2621](https://doi.org/10.1038/nrn2621).



Primeri senzoričnih nevronov

- Prosti živčni končiči
 - bolečina
 - temperatura
- Merkelovi taktilni meniski
- Lasni mešički (dotik)
- Meissnerjeva telesca (dotik)
- Vaterr Pacinijeva telesca (pritisk)
- Krausejeva telesca (hladno)
- Ruffinijeva telecsa
- Mišično vreteno (razteg)
- Golgijev tetiven organ (napetost)



Tactile Receptors in the Skin

Vir: Blausen.com staff (2014). "[Medical gallery of Blausen Medical 2014](#)".
WikiJournal of Medicine 1 (2). DOI:[10.15347/wjm/2014.010](https://doi.org/10.15347/wjm/2014.010). ISSN 2002-4436
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blausen_0809_Skin_TactileReceptors.png

Predavanje: Brain as processing machine

- http://www.ted.com/talks/michael_merzenich_on_the_elastic_brain.html
- <https://www.youtube.com/watch?v=It8SJQkseHE>



Ostale zanimive povezave...

- [https://www.ted.com/talks/jeff hawkins how brain science will change computing](https://www.ted.com/talks/jeff_hawkins_how_brain_science_will_change_computing)
- [https://www.ted.com/talks/dan dennett the illusion of consciousness](https://www.ted.com/talks/dan_dennett_the_illusion_of_consciousness)
- Sergiu P. Pasca: How We're Reverse Engineering the Human Brain in the Lab | TED
<https://youtu.be/ABmRCdnVq3E>
- [https://www.ted.com/talks/oliver sacks what hallucination reveals about our minds](https://www.ted.com/talks/oliver_sacks_what_hallucination_reveals_about_our_minds)



Electroencefalografija - EEG

& električna aktivnost možganov

Zgodovina EEG

- **Richard Caton** (1875) – lokalizacija senzoričnih funkcij pri opicah in zajcih.
- **Hans Berger** (1924) – prvo snemanje signalov EEG na ljudeh - opisal je alfa valovanje in njegovo supresijo v primerjavi z valovanjem beta.
- **William Grey Walter** – pod vplivom Ivana Pavlova in Hansa Bergerja, dodelal snemanje signalov EEG in odkril valovanje delta (1937) in theta (1953)



Prvi signal EEG, ki ga je leta 1924 posnel Hans Berger. Zgornji signal je EEG, spodnji pa referenčni signal s frekvenco 10 Hz (za merjenje časa).

Hans Berger (1924)

EEG - seštevek el. potencialov

EEG je seštevek ekscitatornih in inhibicijskih postsinaptičnih potencialov (EPSP, IPSP)

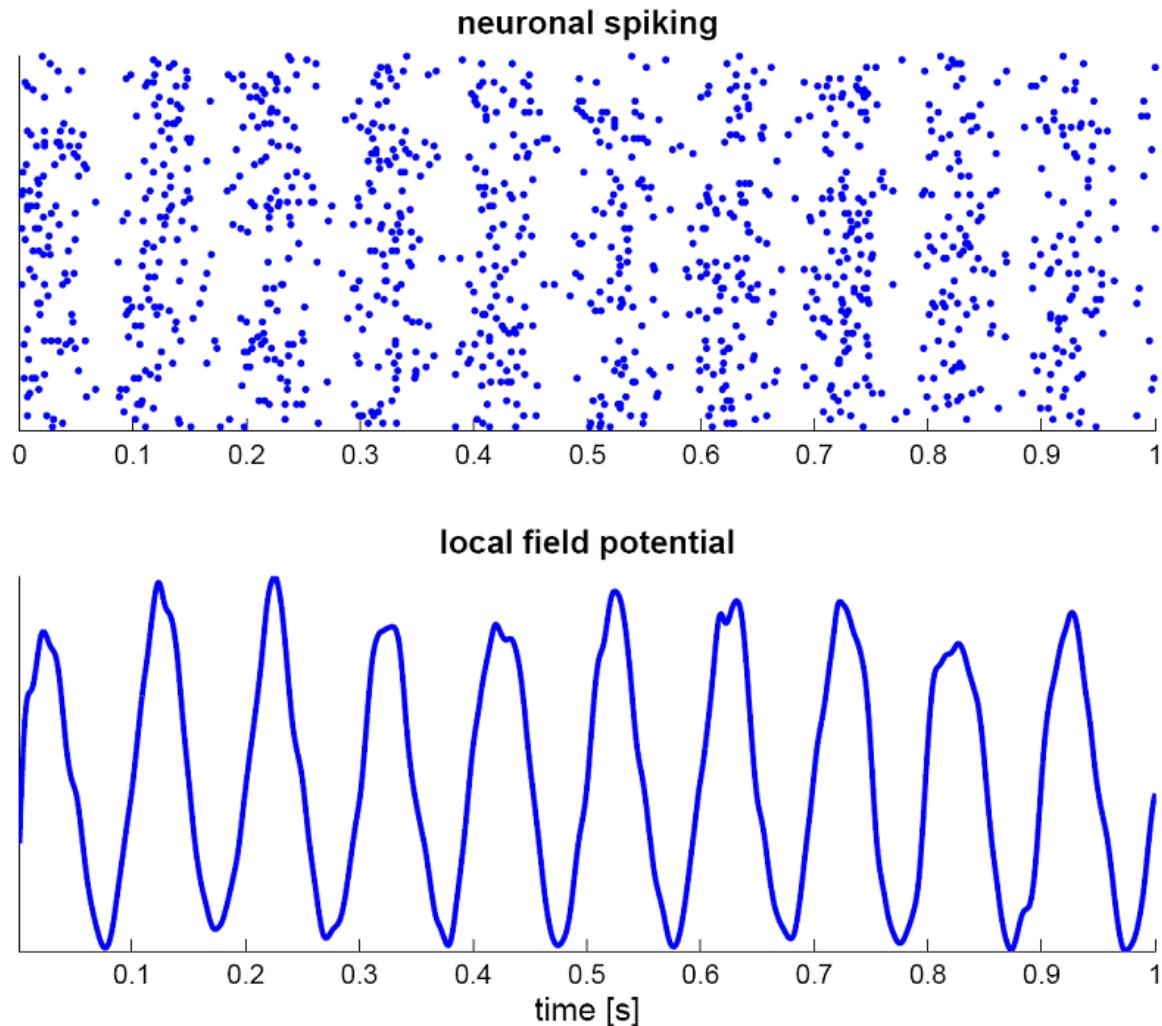
EEG ne meri:

- akcijskih potencialov
- vsote akcijskih potencialov

EEG meri:

- obteženo vsoto postsinaptičnih potencialov (PSPs) piridalnih nevronov: ob PSP nastane med telesom piridalnega nevrona in sinapso apikalnega dendrita el. dipol

Oscilacije v aktivnosti nevronov



Simulacija nevronske nihanj pri 10 Hz. Zgornji graf kaže potenciale posameznih nevronov (vsaka pika predstavlja individualni akcijski potencial znotraj populacije nevronov). Spodnji graf prikazuje lokalni el. potencial, ki odraža obtežen seštevek aktivnosti vseh nevronov.

Sinhronizirane aktivnosti velikega števila nevronov povzročijo makroskopske oscilacijske električna polja, ki jih je mogoče opaziti v EEG in MEG.

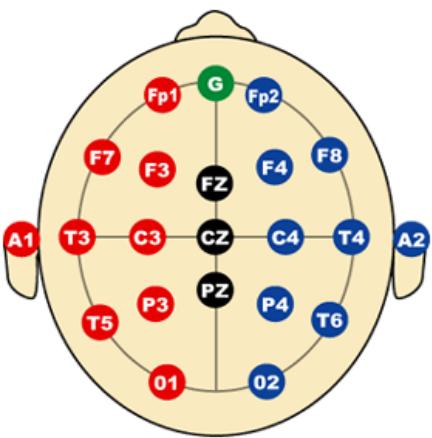
Snemanje signalov EEG



- 8 – 64 kanalov posnetih sočasno iz elektrod, ki so po glavi razmeščene po mednarodnem standardu 10-20 (oz njegovih izpeljankah).

Potrebna oprema:

- Elektrode & kapa
- Ojačevalnik
- Filtri
- A/D pretvornik
- Računalnik



Terminologija Sistema 10/20

Koren nosu (Nasion):

točka na vrhu
nosnega korena

Zatilni rob lobanje (Inion):

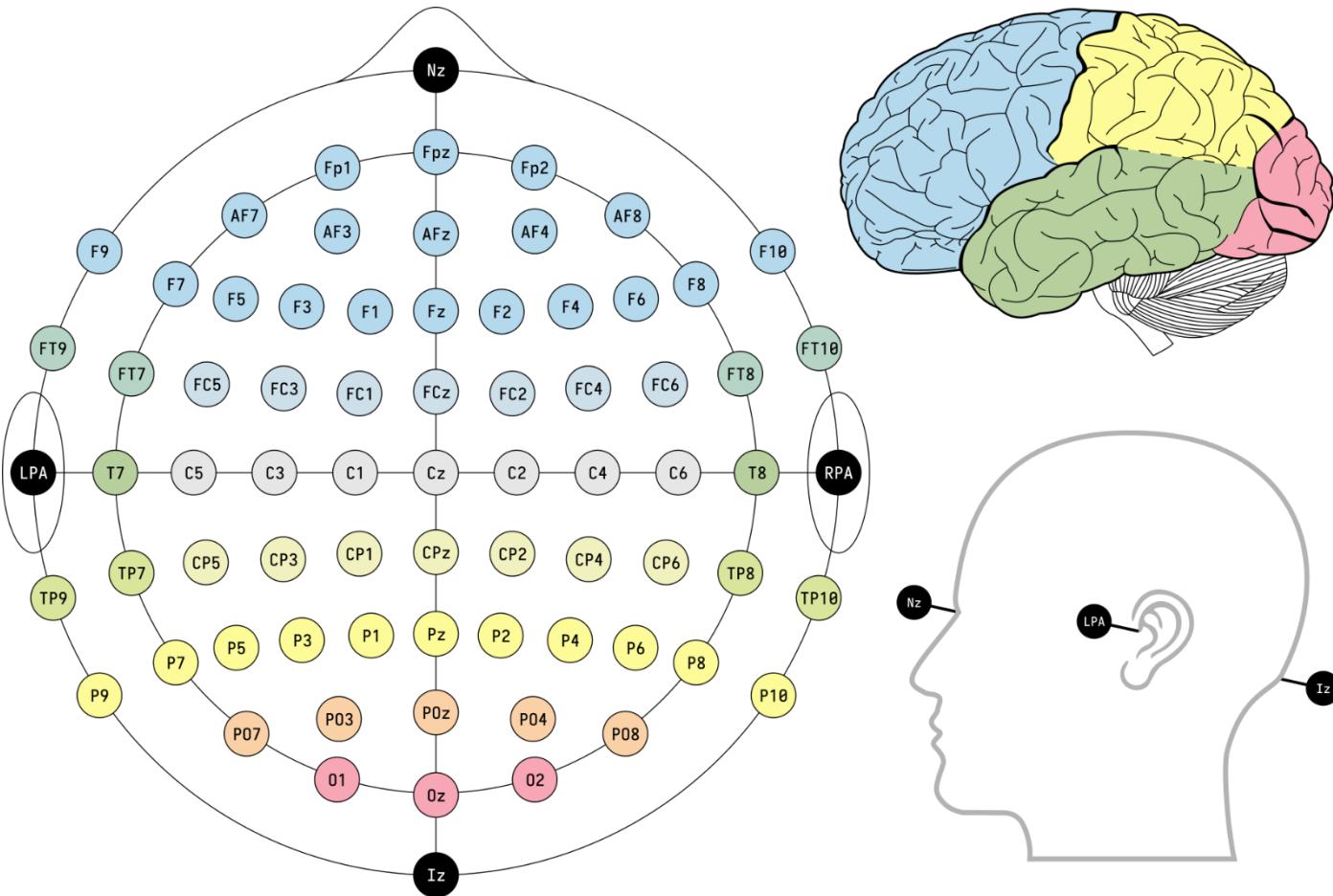
zadebelina na dnu
hrbtne strani lobanje

Lokacije:

- Frontal (čelni reženj),
- Temporal (senčni reženj),
- Parietal (temenski reženj)
- Occipital (zatilni reženj)
- Central (centralni)

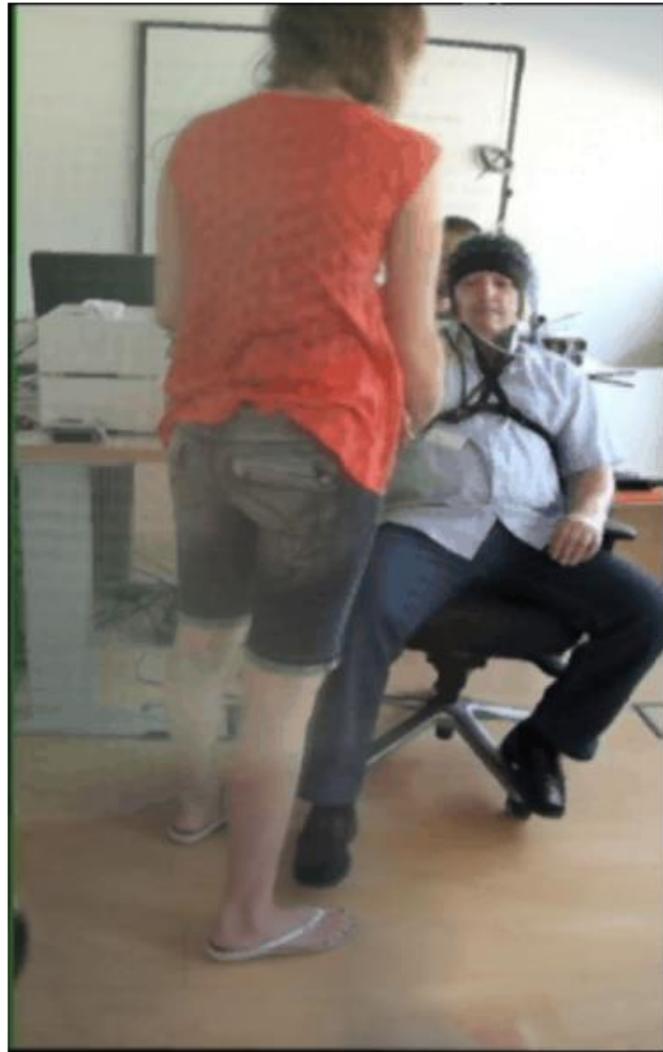
Številke:

- z za centralno linijo
- Soda števila (2,4,6)
desna hemisfera,
- liha (1,3,5) leva
hemisfera



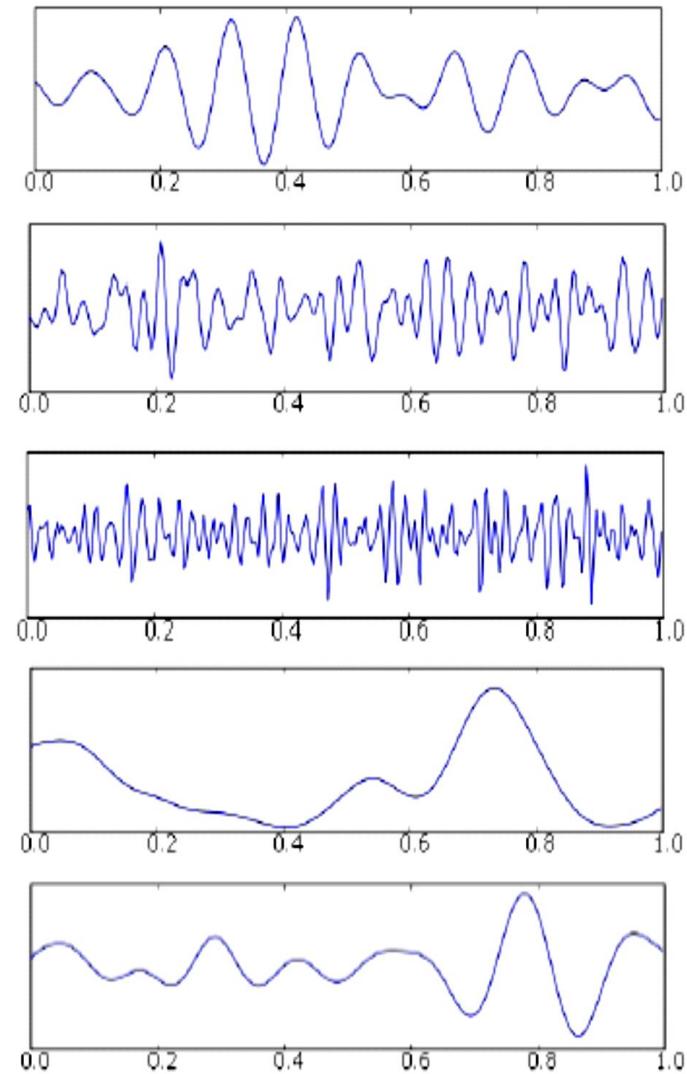
Vir: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EEG_10-10_system_with_additional_information.svg

Namestitev elektrod EEG & EMG

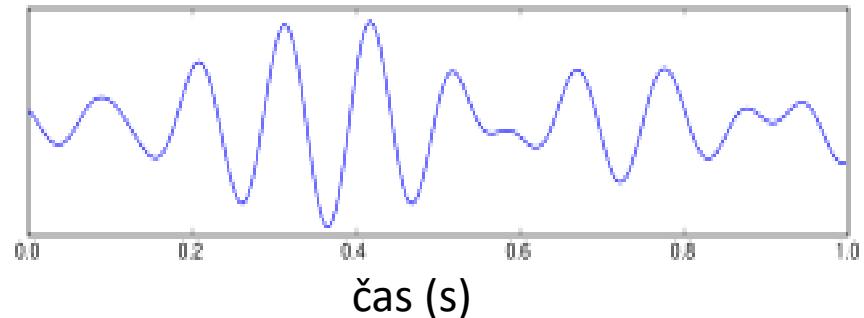


Osnovna možganska valovanja

- **alfa** (8 – 13 Hz):
budno stanje, stanje sproščenosti, zaprte oči, spanje REM
- **beta** (13 – 30 Hz):
budno stanje, stanje pripravljenosti/pozornosti; spanje REM
- **gama** (> 30 Hz):
spomin (?)
- **delta** (0.5 – 4 Hz):
globok spanec
- **theta** (4 – 8 Hz):
dojenčki, spanje pri odraslih

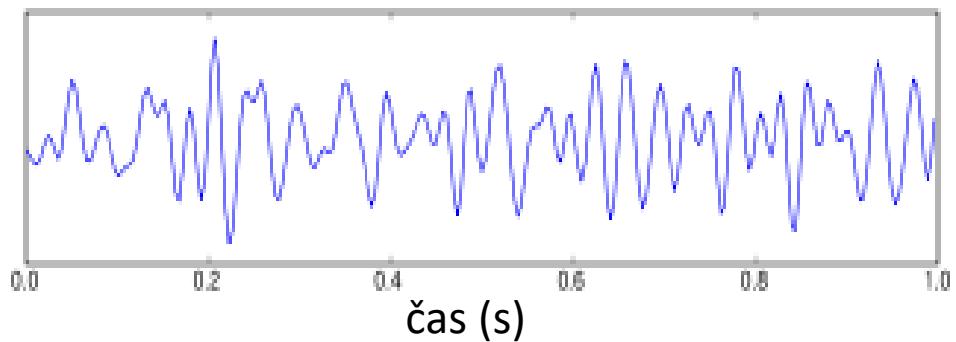


Valovanje Alfa



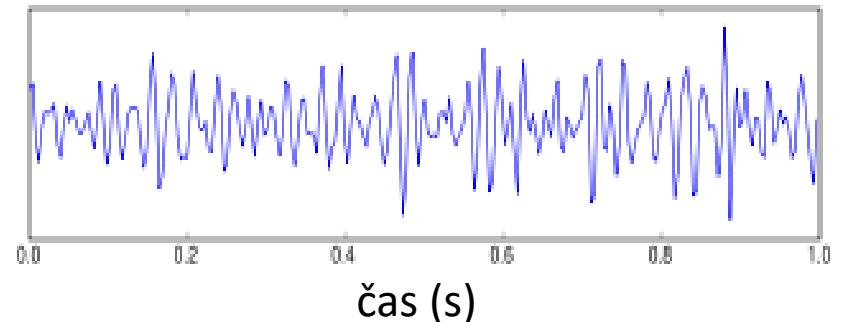
- Karakteristike:
 - frekvenca: 8 - 13 Hz
 - amplituda: 20 - 60 μ V
 - lokacija: pretežno v zatilnem in temenjskem režnju (obe strani) med sproščenostijo v zbijenem stanju z zaprtimi očmi, možen izvor v talamusu
- Zelo lahko ga je vzbuditi: **sproščeno sedenje z zaprtimi očmi** (zelo malo ljudi ima težave z generiranjem ritma alfa).
- Valovi alfa se zmanjšajo/izginejo ko odpremo oči, smo zaspani, spimo (razen spanje REM).
- Verjetno **odražajo inhibicijo neaktivnih centrov korteksa**.
- Mentalna aktivnost blokira/prepreči valovanje alfa.

Valovanje Beta



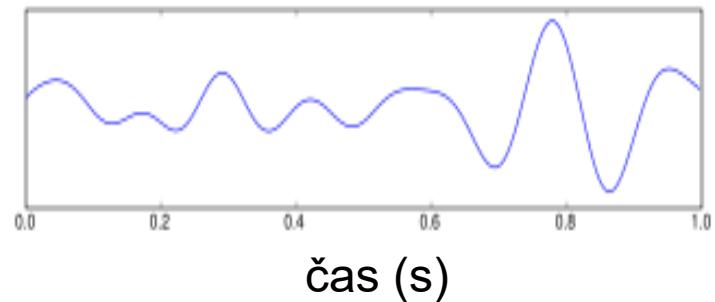
- Karakteristike:
 - frekvenca : 14 - 30 Hz
 - amplituda: 2 - 20 μ V
 - lokacija : simetrična porazdelitev (obe hemisferi), najmočnejše v frontalnem režnju.
- Najpogostejše možgansko valovanje, prisotno med mentalnimi aktivnostmi.
- Tri podskupine:
 - Visoko valovanje Beta (19 Hz+)
 - Valovanje Beta (15–18 Hz)
 - Nizko valovanje Beta (12–15 Hz)
- nizkoamplitudni valovi beta z več in spremenljajočimi se frekvencami pogosto odražajo **aktivno/intenzivno razmišljanje, zaskrbljenost in/ali visoko stopnjo koncentracije**.
- Skupki (*bursts*) aktivnosti beta so povezani z ječanjem senzoričnih povratnih informacij v pripravah na gibanje in izginejo med samimi gibi. Po koncu giba se ponovno pojavijo (***beta rebound***).

Valovanje Gama



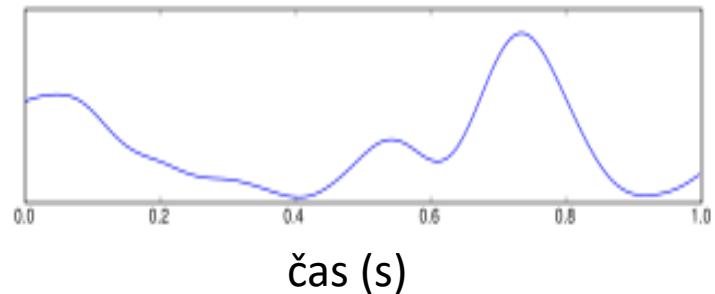
- Karakteristike:
 - frekvenca : 25 – 40 Hz
 - amplituda: 3 – 5 μ V
 - lokacija : Somatosenzorični korteks
- Pojavi se:
 - ob nenadnem senzoričnem stimulansu
 - med procesiranjem večmodlanega čutenja (percepcija z dvema ali več različnimi čutili – npr. sluh in vid)
 - med kratkočasovnim ujemanjem spominskih vzorcev in prepoznanih objektov, zvokov ali taktilnih občutij (fokusiranje pozornosti).

Valovanje Theta



- Karakteristike:
 - frekvenca : 4 – 7 Hz
 - amplituda: 20 – 100 μ V
 - lokacija : različne lokacije
- Naj bi bili **bolj pogosti pri otrocih kot pri odraslih.**
- Walter Study (1952) odkril da so ti valovi povezani z **nelagodjem** in **zadovoljstvom**.
- Pojavlja se **med zaspanostjo, meditacijo ali med spanjem**, vendar ne med globokim spanjem.
- Mehanizmi nastanka večinoma neznani.

Valovanje Delta



- Karakteristike:
 - frekvenca : 0.5 - 3.5 Hz
 - amplituda: 20 - 200 μ V
 - lokacija : frontalno pri odraslih, zatilno in temensko pri otrocih
- Pojavi se med **globokim spanjem**.
- Valovi so tipično zelo različni in počasni
- Uporabno za detekcijo tumorjev in abnormalnega delovanja možganov
- Pojavljajo se pri vseh sesalcih.
- Raznolikost spolov: ženske imajo bolj izraženo valovanje delta.

Ostala možganska valovanja

- **Valovanje Mu:**
 - frekvenca : 8 - 13Hz (alfa)
 - značilni ostri pozitivni vrhovi in zaobljeni negativni vrhovi
 - povezano s **senzomotoričnim korteksom** v nedejavnem stanju in izgine med gibom ali med razmišljanjem o gibu (tudi med opazovanjem gibov drugih ljudi – zrcalni nevroni)
 - nekateri ljudje nimajo izrazitega ritma Mu.
- **Valovanje Kappa:**
 - frekvenca : 10 Hz
 - pojavlja se v 30% ljudi med razmišljanjem [Kennedy et al. 1948]
- **Valovanje Lambda:**
 - amplituda: 20-50 μ V
 - valovi trikotne oblike,
 - traja 250 ms, povezano z odzivom na premikajočo se sliko

Topografske mape signalov EEG

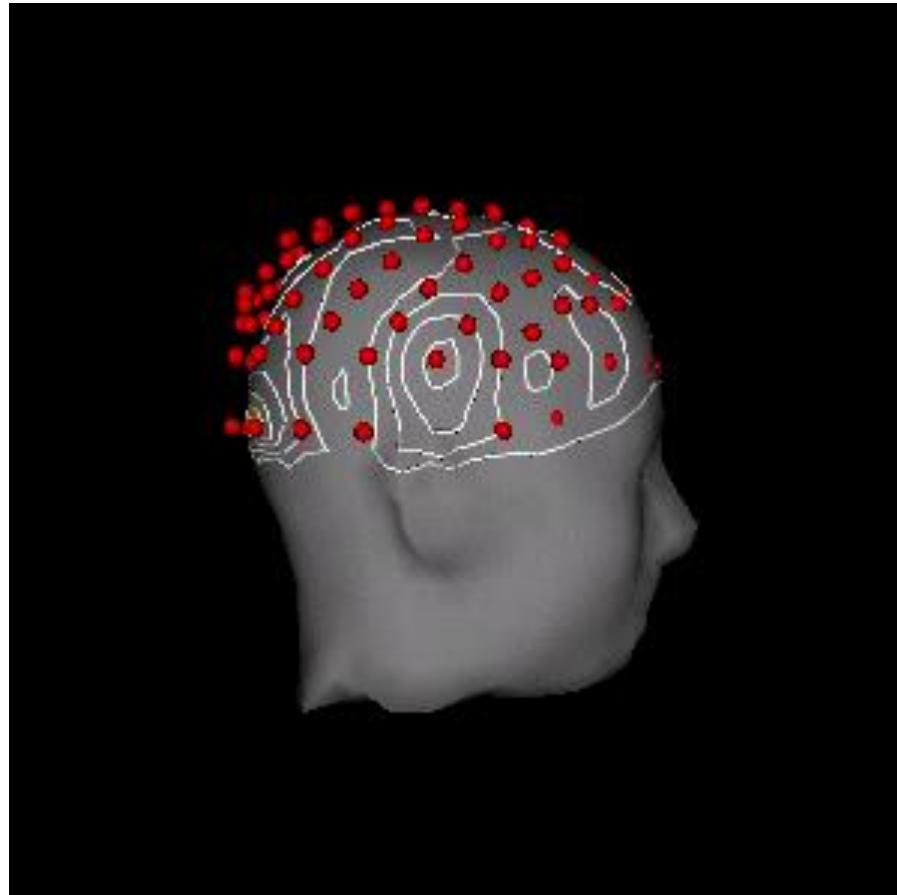
Topografske mape ponazarjajo porazdelitev amplitudo signalov EEG po korteksu.

Vrednosti med posameznimi elektrodami se interpolirajo.

Navadno uporabljamo:

- mape ERP
 - spremembe izzvanega potenciala
- Spektralne mape
 - spremembe frekvence
- Statistične mape
 - primerjava različnih merjenj/subjektov

Primer topografske mape EEG



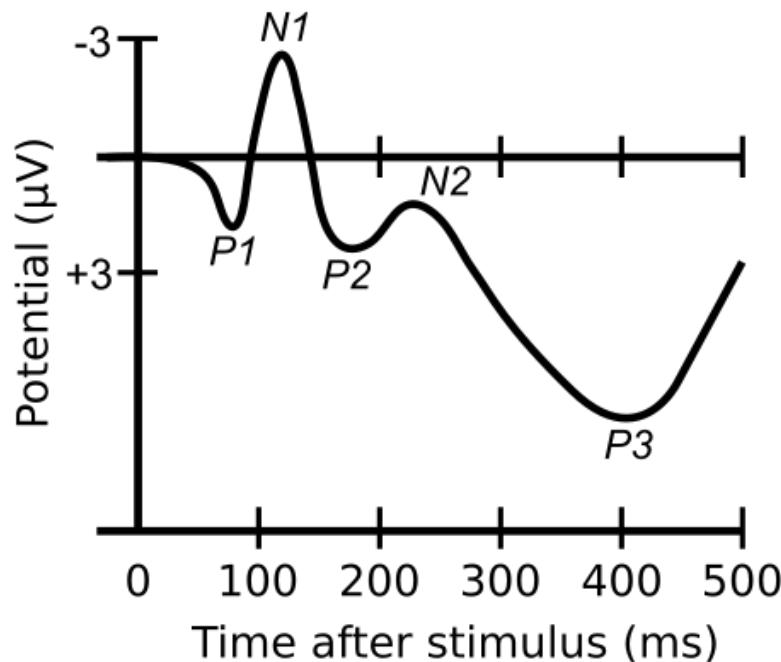
Animacija visoko-frekvenčne električne aktivnosti korteksa, izmerjene na lasiču od 0,5 do 0,2 s pred pritiskom na gumb. Topografska mapa kaže, da je oseba zastavljeni problem rešila s pomočjo vizualnih informacij.

vir: http://www.psych.nwu.edu/~mjungbee/PLoS_Supp.htm

Poučen video: <https://www.youtube.com/watch?v=2edwDBSPLFs>

Vzbujeni (evoked potentials - EP) in dogodkovni potenciali (Event Related Potentials - ERP)

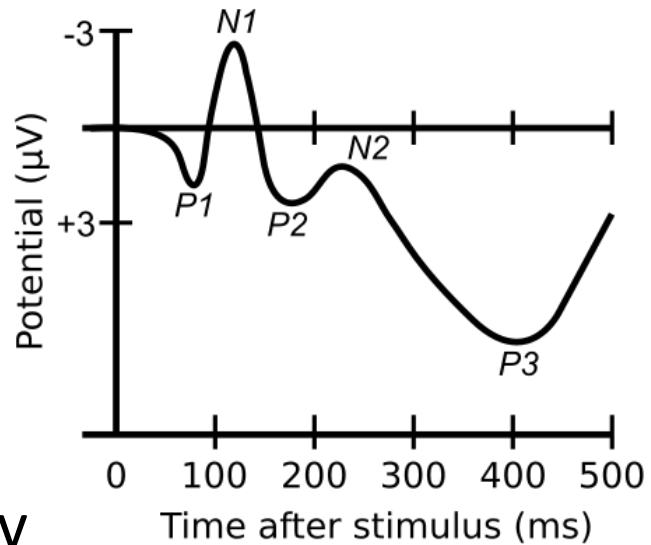
ERP (event related potentials – pri EEG) in ERF (event related fields – pri MEG) so pogosto sestavljeni el. potenciali in se interpretirajo s pomočjo njihovih komponent.



vir: http://en.wikipedia.org/wiki/Evoked_potential,
http://en.wikipedia.org/wiki/Event-related_potentials

EP vs. ERP/ERF

- izzvan (vzbujen) potencial (EP)
 - kratke zakasnitve (< 100 ms)
 - majhne amplitude (< 1 μ V)
 - odraža obdelavo senzoričnih signalov
- dogodkovni potencial (ERP / ERF)
 - daljše zakasnitve (100 – 600 ms),
 - višje amplitude (10 – 100 μ V)
 - višji kognitivni procesi (spomin , pričakovanje, pozornost)
- EEG ima ERP-je, magnetoencefalografija (MEG) ima ERF-je (event-related field). Oboji opisujejo iste možganske aktivnosti.



vir: http://en.wikipedia.org/wiki/Evoked_potential,
http://en.wikipedia.org/wiki/Event-related_potentials

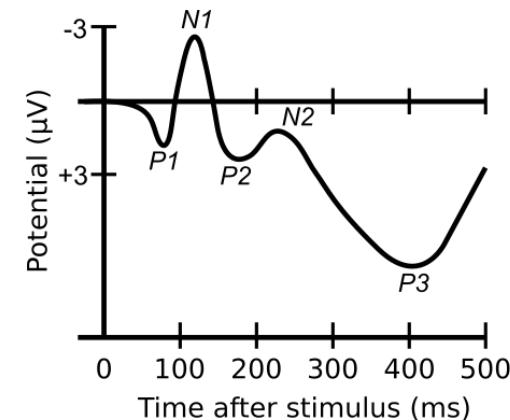
Komponente EP/ERP: nomenklatura

- Imena večine komponent se pričnejo s črko, ki označuje **polarnost** (predznak napetosti) **komponente** (pozitivna, negativna), sledi pa ji okvirna zakasnitev komponente (v milisekundah) glede na zunanji dražljaj.
 - N400: ta komponenta ima negativno polarnost, pojavi pa se približno 400 ms za dražljajem.
 - P600: komponenta s pozitivno polarnostjo, ki se pojavi 600 ms za dražljajem.
- Navedene zakasnitve so običajno precej variabilne; na primer, komponenta N400 se lahko pojavi kjerkoli med 300 ms in 500 ms po dražljaju.

Poglavitne znane

komponente EP/ERP:

- **C1**: vizualno izvan potencial (visually evoked potential – VEP), v primarnem vizualnem korteksu, 65-90 ms za dražljajem, pozitivna ali negativna polarnost.
- **P100** ali **P1**: VEP, moduliran s pozornostjo na viden objekt, lateralna zatilna regija, 80-130 ms za dražljajem.
- **N100** ali **N1**: reakcija na vizualni, zvočni, vohalni in bolečinski dražljaj, frontalno-centralna regija, 80-200 ms za dražljajem.
- **N200** ali **N2**: frontalna regija, 200-350 ms za zvočnim ali vidnim dražljajem, odraža kognitivne procese.
- **N170**: VEP v zatilno-senčni regiji, izvan s slikami obrazov, 130-200 ms za dražljajem
- **P200** ali **P2**: VEP v centralno-frontalni temensko-zatilni regiji, 150-275 ms za dražljajem, **odraža vizualno iskanje in pozornost**.
- **P300** ali **P3 (P3a, P3b)**: temenska regija, 300-600 ms za dražljajem, odraža evalvacijo stimulansa oz. njegovo kategorizacijo, ima zelo dobro ponovljivost in veliko amplitudo (v primerjavi z ostlimi komponentami).
- **N400** ali **N4**: VEP v centralno-temenski regiji, 250-500 ms za dražljajem, odraža kognitivni odziv na vizualno predstavitev besed in ostalih dražljajev s pomenom.
- **P600**: vizualni ali zvočni ERP v centralno-temenski regiji, 500-700 ms za dražljajem, povezan z razpoznavanjem jezika/besed.



Jezikovno specifične komponente ERP

- **N400**: označevalec semantičnega neujemanja (Semantic mismatch marker)
- **P600**: označevalec sintaktičnega neujemanja (Syntactic mismatch marker)

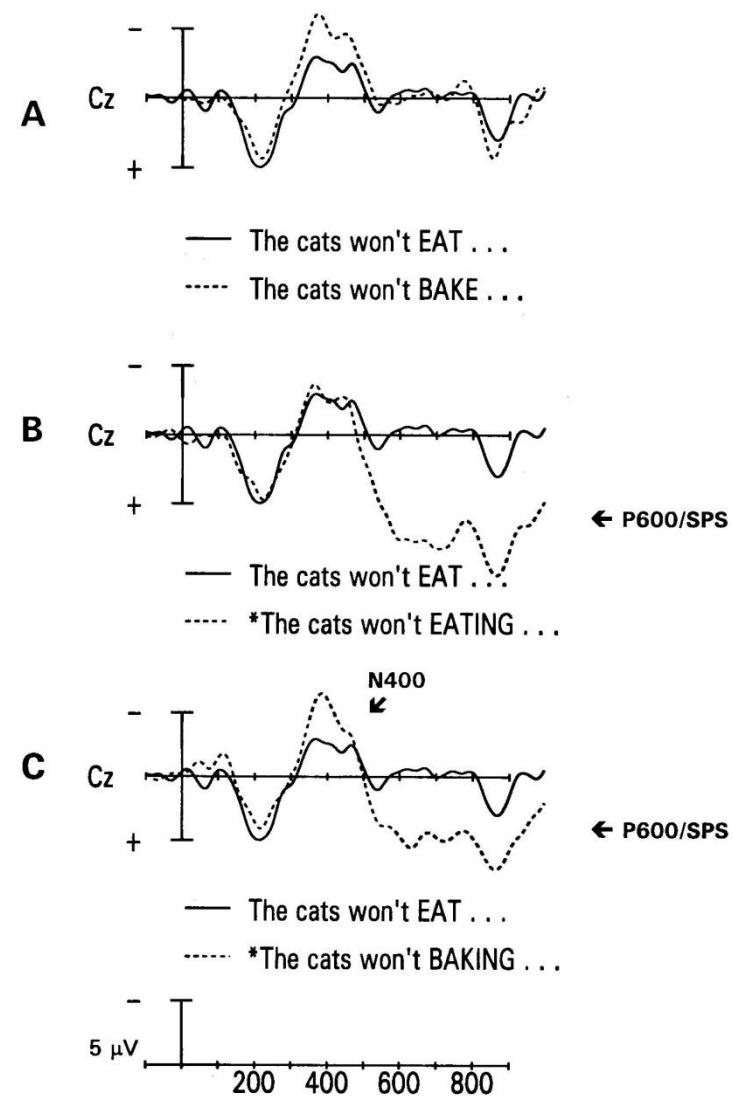
Primeri stavkov:

Pravilno (osnova): The cats won't eat the food
Mary gives them.

Semantično neujemanje: The cats won't bake the food
Mary gives them.

Sintaktično neujemanje: The cats won't eating the food
Mary gives them.

Semantično in sintaktično neujemanje: The cats won't baking the food
Mary gives them.



Vmesniki možgani-stroj Brain-Computer Interface (BCI)

“A BCI is a device that does not use the normal neuromuscular output pathways of the brain, but accepts commands encoded in neurophysiological signals.”

Jacques Vidal, 1973

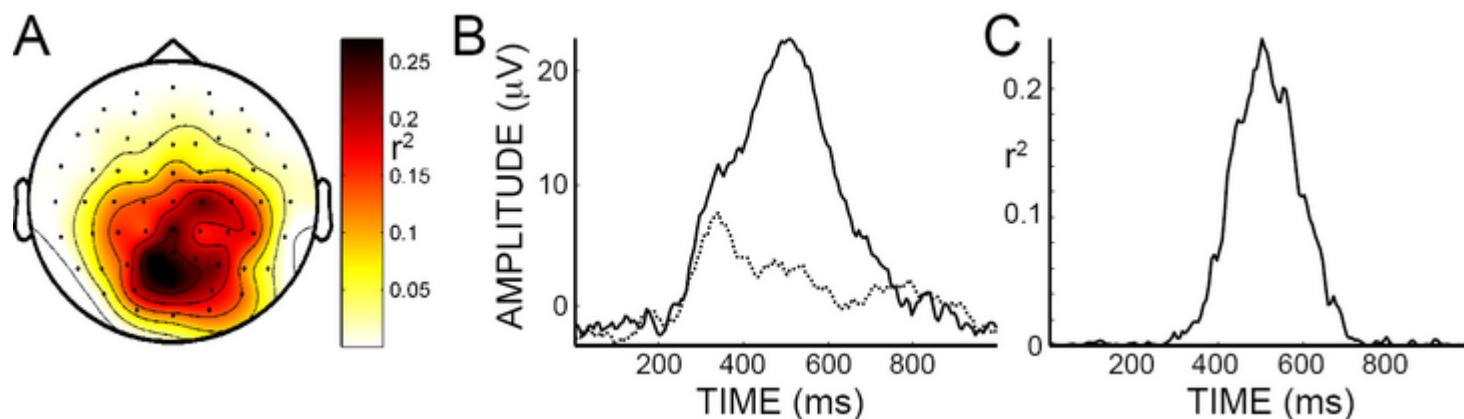
VIDEO-predavanje: Machine Learning and Signal Processing Tools for BCI

Klaus-Robert Müller, Fraunhofer Institute Computer Architecture and Software Technology
Benjamin Blankertz, Machine Learning and Intelligent Data Analysis Group, TU Berlin

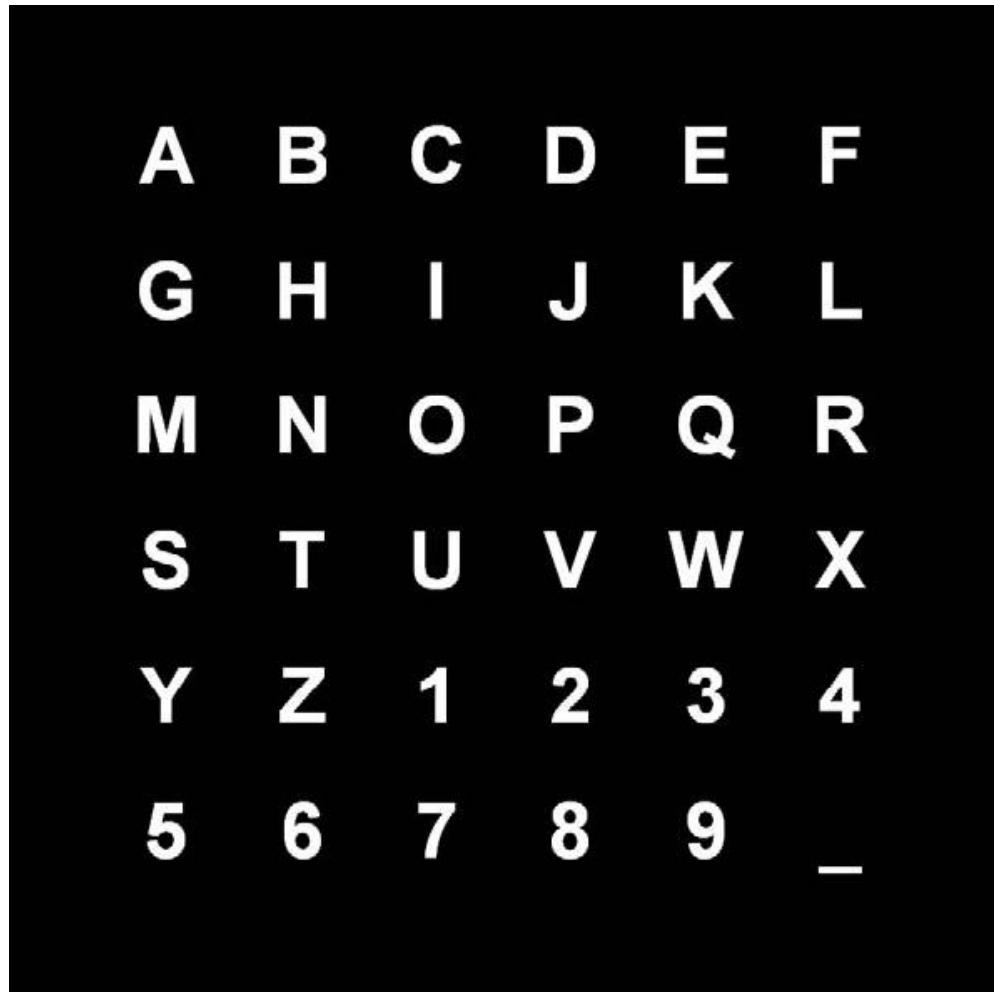
http://videolectures.net/bbci09_blankertz_muller_mlasp/

P300

- Pogoji za uspešno izvan potencial :
 - je prisotno naključno zaporedje različnih dražljajev.
 - obstaja klasifikacijsko pravilo, ki razdeli zaporedje dražljajev v dve kategoriji.
 - Uporabnikovo opravilo mora temeljiti na uporabi zgoraj omenjenega klasifikacijskega pravila.
 - Ena izmed obeh kategorij dražljajev se mora pojavljati manj frekventno (v primerjavi z drugo).



P300 Speller



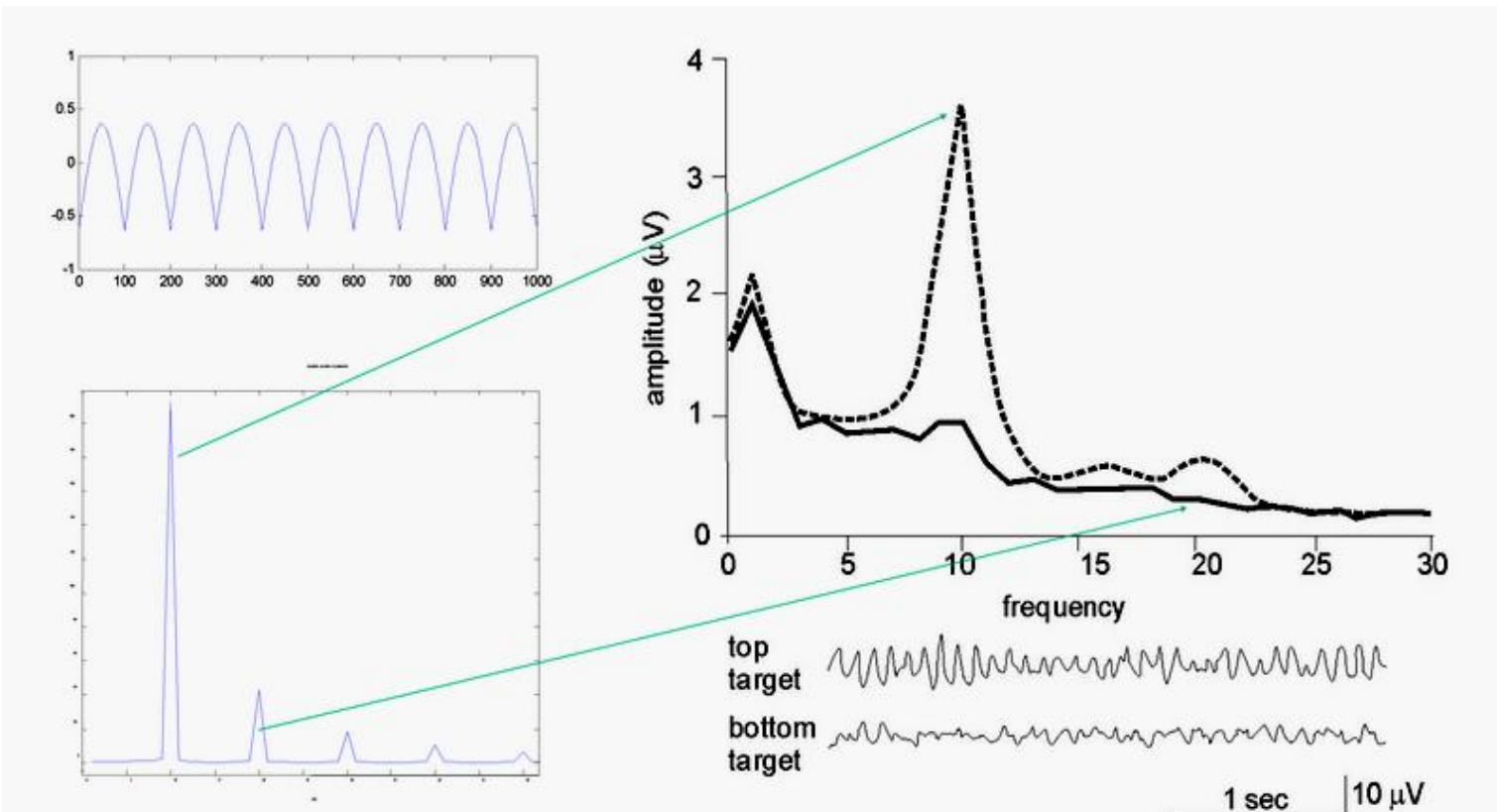
Hitrost komunikacije:
4 znakov/min,
do 40 znakov/min

Primer uporabe: <https://www.youtube.com/watch?v=y3lGJVnSSsg>

ERS & ERD

- **ritem mu:** primarna senzorična in motorična področja kortexa kažejo ritmične aktivnosti na frekvencah 8 - 12 Hz, ko ne obdelujejo senzoričnih informacij ali ko ne izvajajo gibov.
- **dogodkovna desinhronizacija (event-related desynchronization - ERD):** gibanje ali pripravo na gibanje ponavadi spremi znižanje ritma mu, predvsem v kontralateralni hemisferi kortexa (na nasprotni strani gibanja: leva roka – desna hemisfera, itd.).
- **dogodkovna resinhronizacija (event-related synchronization - ERS):** nasprotje ERD, pojavi se po zaključku gibanja, ob prehodu v sproščeno stanje.
- Vir:[http://www.bci2000.org/wiki/index.php/User Tutorial: Introduction to the Mu Rhythm](http://www.bci2000.org/wiki/index.php/User_Tutorial:_Introduction_to_the_Mu_Rhythm)

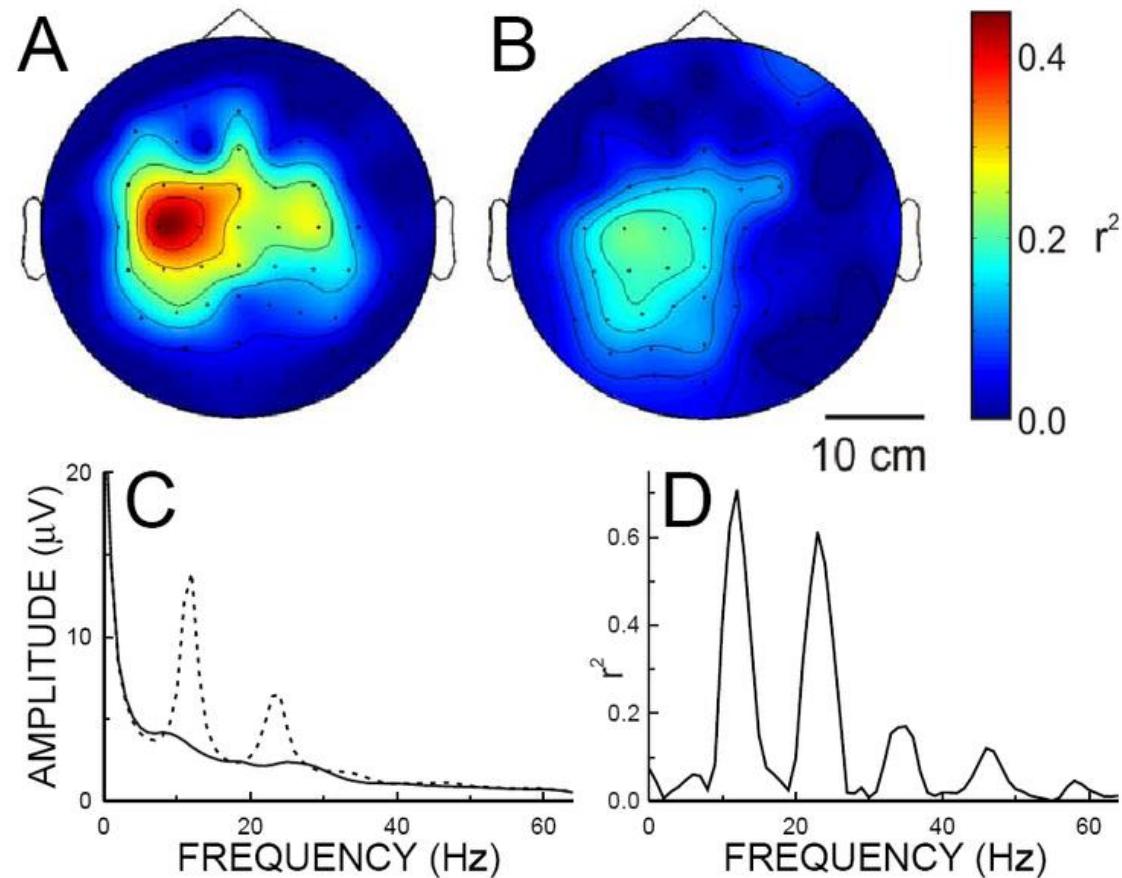
Ritem mu



Mu ritem ima ponavljajoče valove z asimetričnimi vrhovi (maksimumi vs. minimumi), kot prikazuje slika levo zgoraj. V frekvenčnem prostoru ima takšno valovanje spekter z močno osnovno frekvenco in manj izrazitimi višjimi harmoniki (slika spodaj levo). To pomeni, da je drugi vrh (drugi harmonik) v frekvenčnem pasu valovanja beta. Relativna sprememba amplitудe je pri obeh vrhovih najpogosteje enaka (primerljiva). Višji harmoniki torej ne nosijo dodatne informacije. Desna slika prikazuje spekter ritma mu, ocenjen iz izmerjenih (eksperimentalnih) signalov EEG med mirovanjem (črtkana črta) in gibom (polna črta).

ERS & ERD

A,B: Topografska mapa razlik (merjenih s cenilko r^2 , ki meri delež variance EEG, ki jo povzroči dražljaj/opravilo) med dejanskim (A) in zamišljenim (B) premikom desne roke in mirovanjem. EEG signali so bili filtrirani s pasovno-prepustnim filtrom (9 – 12 Hz).



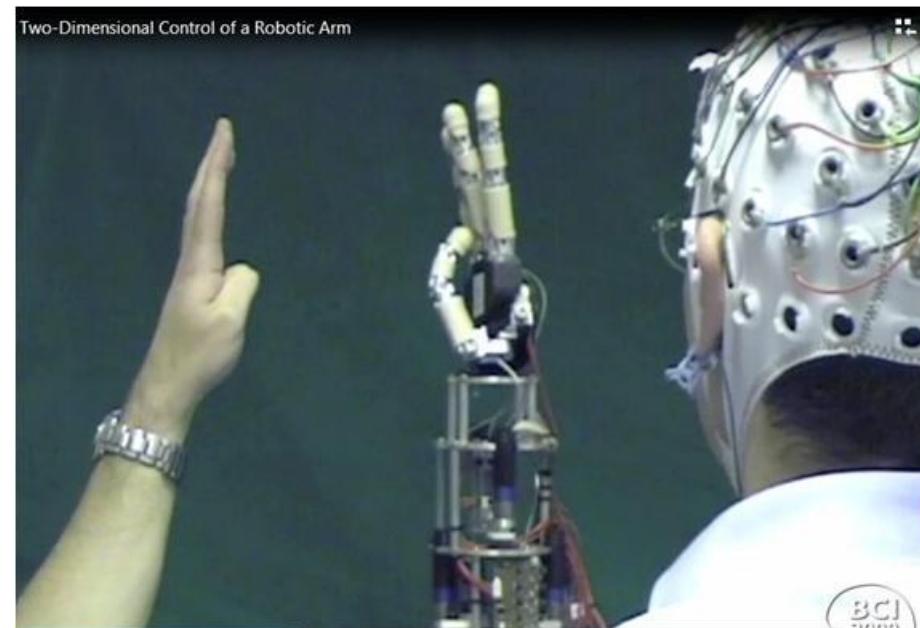
- C:** Primer spektra signala EEG, posnetega na lokaciji C3 (senzomotoričen korteks) med mirovanjem (črtkasta črta) in zamišljenim gibom (polna črta).
- D:** Metrika r^2 razlik med mirovanjem in zamišljenim gibom (pozicija C3 – senzomotoričen korteks). Opazna sta vrhova v frekvenčnem območju valovanj alfa in beta, ki odražata osnovno frekvenco in prvi višji harmonik ritma mu.

Primeri vmesnikov BCI

<http://www.bci2000.org/BCI2000/Videos/Videos.html>



“In this movie, a subject uses scalp-recorded sensorimotor rhythms to control a computer cursor in one dimension (up/down). The subject’s task is to select characters using the word processing software “Dasher.” The subject spells the word “hello” in 30 seconds.”



“In this movie, a subject uses scalp-recorded sensorimotor rhythms to control a robotic arm in two dimensions (one dimension controls the thumb; the other dimension controls the other fingers).”

Primeri vmesnikov BCI

<http://www.bci2000.org/BCI2000/Videos/Videos.html>



“A subject demonstrates selection of an item from an icon-based menu using a 2-state BCI that is controlled by scalp-recorded mu-rhythm modulation. In a first scene, the subject turns off the light...”



“BCI in playing games (youtube: Berlin Brain Computer Interface).”

Komercialni vmesniki BCI



g.tec



Berlin BCI



Emotiv Systems



Emotiv

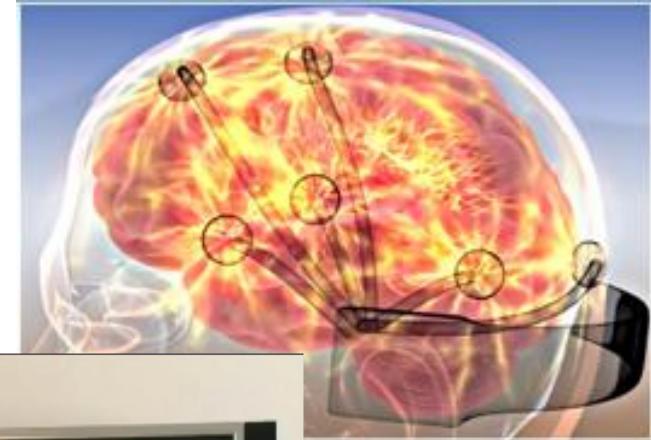


Media Lab Europe



Vmesniki možgani-stroj

- realnočasovno zaznavanje uporabnikovih odzivov na dražljaje in razpoloženja
- zaznavanje miselnega sodelovanja
- prilagajanje virtualnega okolja in bivalnih prostorov razpoloženju uporabnika
- prilagajanje in personalizacija grafičnih vmesnikov
- igranje računalniških iger (igra, ki se odziva na uporabnikova čustva)
- neverbalna komunikacija na daljavo



© <http://www.emotiv.com/>



Smartphone Brain Scanner
Cognitive Systems Section
DTU Informatics

© <http://milab.imm.dtu.dk/eeg>

Vmesniki BCI: aplikacije



Branje kodov vizualnega korteksa

Reconstructing Visual Experiences from Brain Activity Evoked by Natural Movies <https://www.youtube.com/watch?v=nsjDnYxJ0bo>

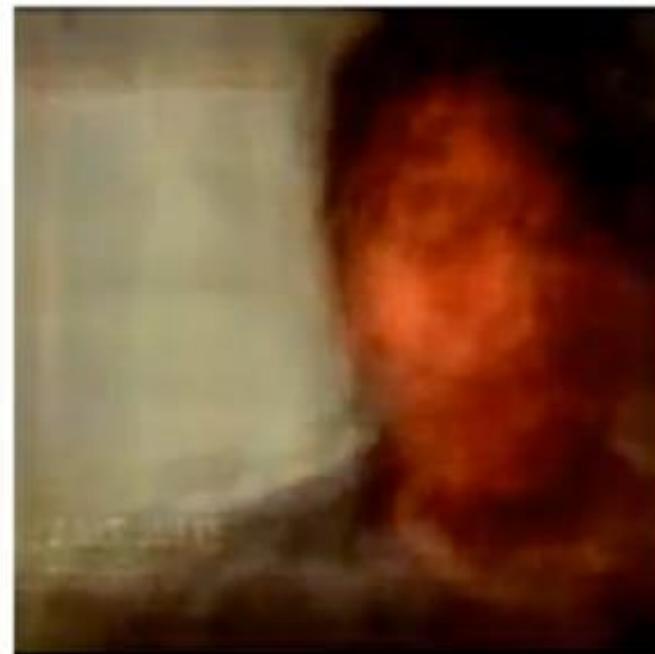
Reconstruction from brain activity



Presented clip



Clip reconstructed
from brain activity



Izvori motenj in šuma v EEG

Fiziološki izvori

- premiki oči
- aktivnosti mišic
- EKG
- aktivnost nevronov, ki niso predmet preučevanja
(background EEG)

Zunanji izvori

- Elektrode
- omrežna napetost (50 Hz)
- stik koža-elektroda in gibanje (*movement artifacts*)

Izboljšanje razmerja signal-šum (signal-to-noise ratio)

- EEG ima ničelno povprečje: ionski tokovi so ujeti v človeško telo (tok v elektrodah prenašajo elektroni).
- Zgornja lastnost omogoča izboljšanje razmerja signal-šum s pomočjo povprečenja EP/ERP-jev.
- Potrebno število EP/ERP-jev pri povprečenju :
 - velike komponente (npr. P300): 30 – 60 EP/ERP-jev
 - srednje komponente: 150 – 200 EP/ERP-jev
 - majhne komponente: 400 – 800 EP/ERP-jev
 - dvojno število pri otrocih in psihiatričnih bolnikih



WORKSHOP BCN24

“A journey into brain activity”

From EEG and related potentials to connectivity and source modeling

Day 1: EEG signal acquisition and preprocessing.

Day 2: ERP and MRCP studies and movement intention for device control.

Day 3: Source localization and brain connectivity.

Day 4: Networking with hospitals, companies, and research centers.



REGISTER NOW

Funded by the European Union GA 101079392
 UK Research and Innovation GA 10052152
 University of Maribor
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH
 CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
 Imperial College London

February 6th –9th 2024
Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain



DAY	Tuesday 6th	Wednesday 7th	Thursday 8th	Friday 9th
	<i>EEG signal acquisition and preprocessing</i>	<i>ERP and MRCP studies and movement intention for device control</i>	<i>Source localization and brain connectivity</i>	<i>Networking with hospitals, companies, and research centers</i>
Presentations		Related cortical potentials measured by EEG: ERPs and MCRPs	EEG source imaging: a practical review	What HybridNeuro Hub can do for you and you for it
	09:30-10:00			Hospitals and companies presentations (I part)
	10:00-10:30	Presentation of HybridNeuro Action and UPC	Computerized computing tasks: cognitive and motor exercises	
	10:30-11:00			
	11:00-11:30	COFFEE BREAK	COFFEE BREAK	COFFEE BREAK
	11:30-12:30	Types of EEG artifacts and how to handle with them	ML and DL methods for movement imaginary BCI: Challenges and future directions	Introduction to functional Brain connectivity
	12:30-13:30	Artifact rejection and reduction by signal processing	Neuro-interfaces for interacting with robotics exoskeletons	Round Table: How to look for synergies between scientists, companies, and hospitals
HoT	13:30-15:00	LUNCH	LUNCH	LUNCH
	15:00-17:00	Artifact reduction using software packages	A MRCP study: experiment preparation, recording and analysis	Practicing brain source localization and functional connectivity



Funded by the European Union
 GA 101079392



UK Research and Innovation
 GA 10052152



University of Maribor



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH



CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Imperial College London

Poletna šola o vmesnikih možgani-stroj in mišice-stroj v Mariboru

Video vsebine na <https://www.youtube.com/@hybridneuro>



REGISTER NOW!

A nighttime photograph of a city skyline, likely Maribor, with buildings and a bridge reflected in the water. The sky is dark, and the city lights are visible.

HYBRID NEURO

FREE REGISTRATION

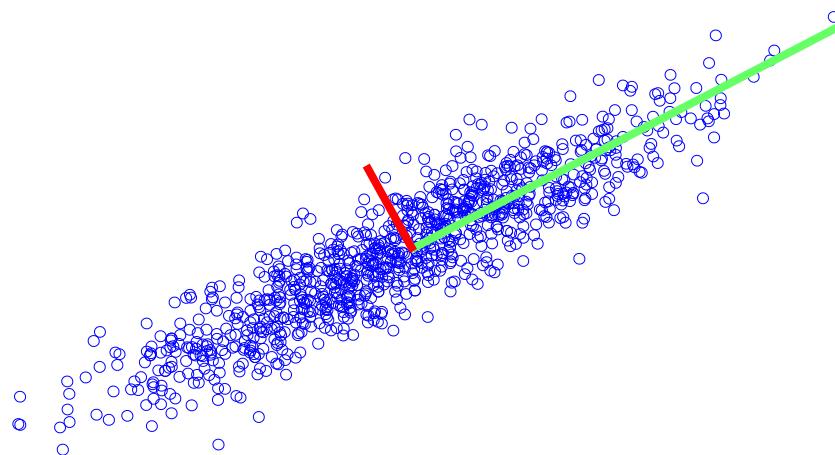
Summer school on
Hybrid Neural Interfaces

July 8th-12th 2024, Maribor, Slovenia

- Surface & intramuscular HDEMG
- Identification of neural codes
- EEG & functional brain connectivity
- Corticomuscular coupling
- Movement augmentation
- Hybrid Neural Interfaces in practice
- Keynote lectures
- Practical examples
- Students 2 students explanations
- Present your project
- Ask top experts
- Active consultations

Analiza poglavitnih komponent

(Principal component analysis)

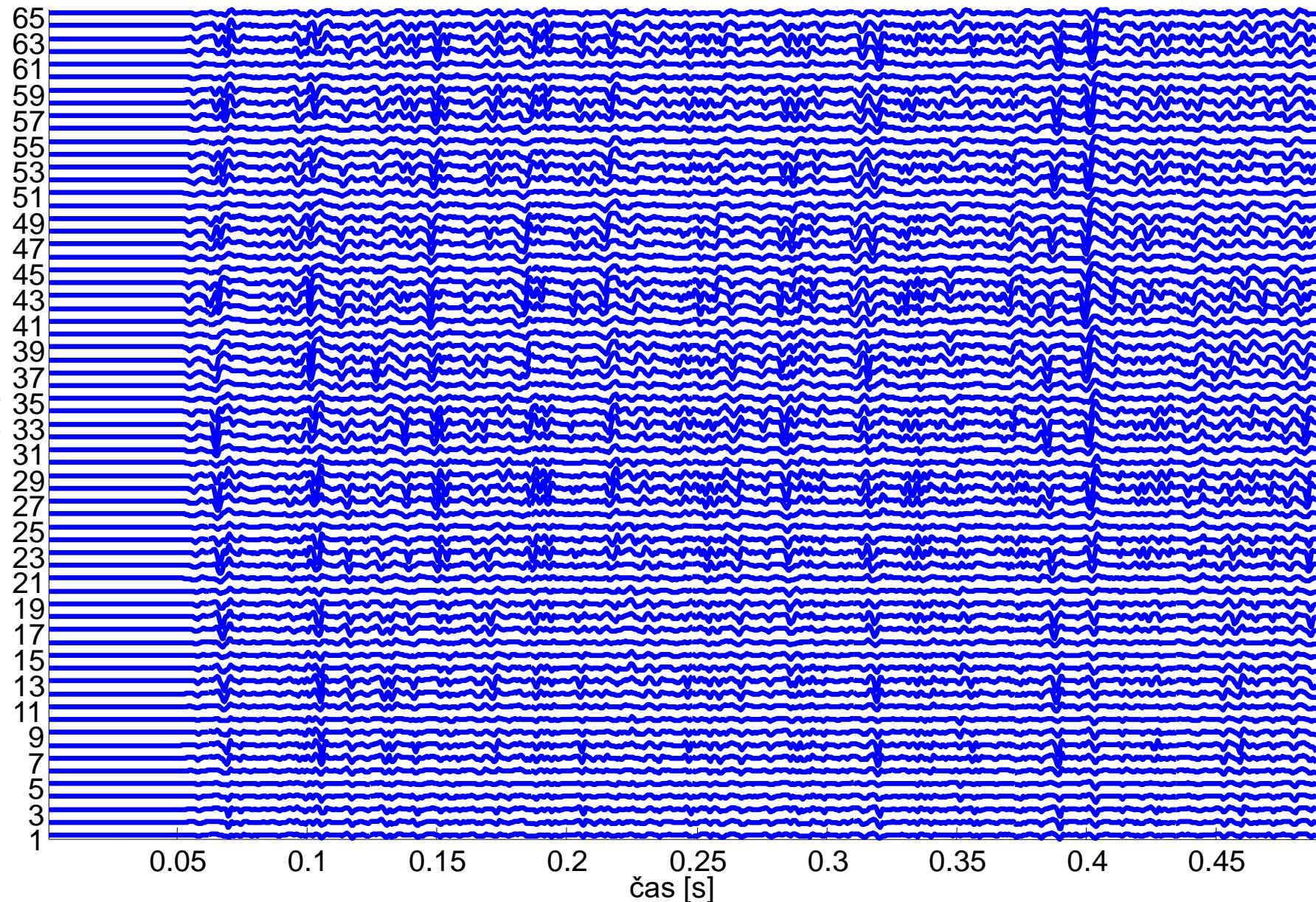


Motivacija

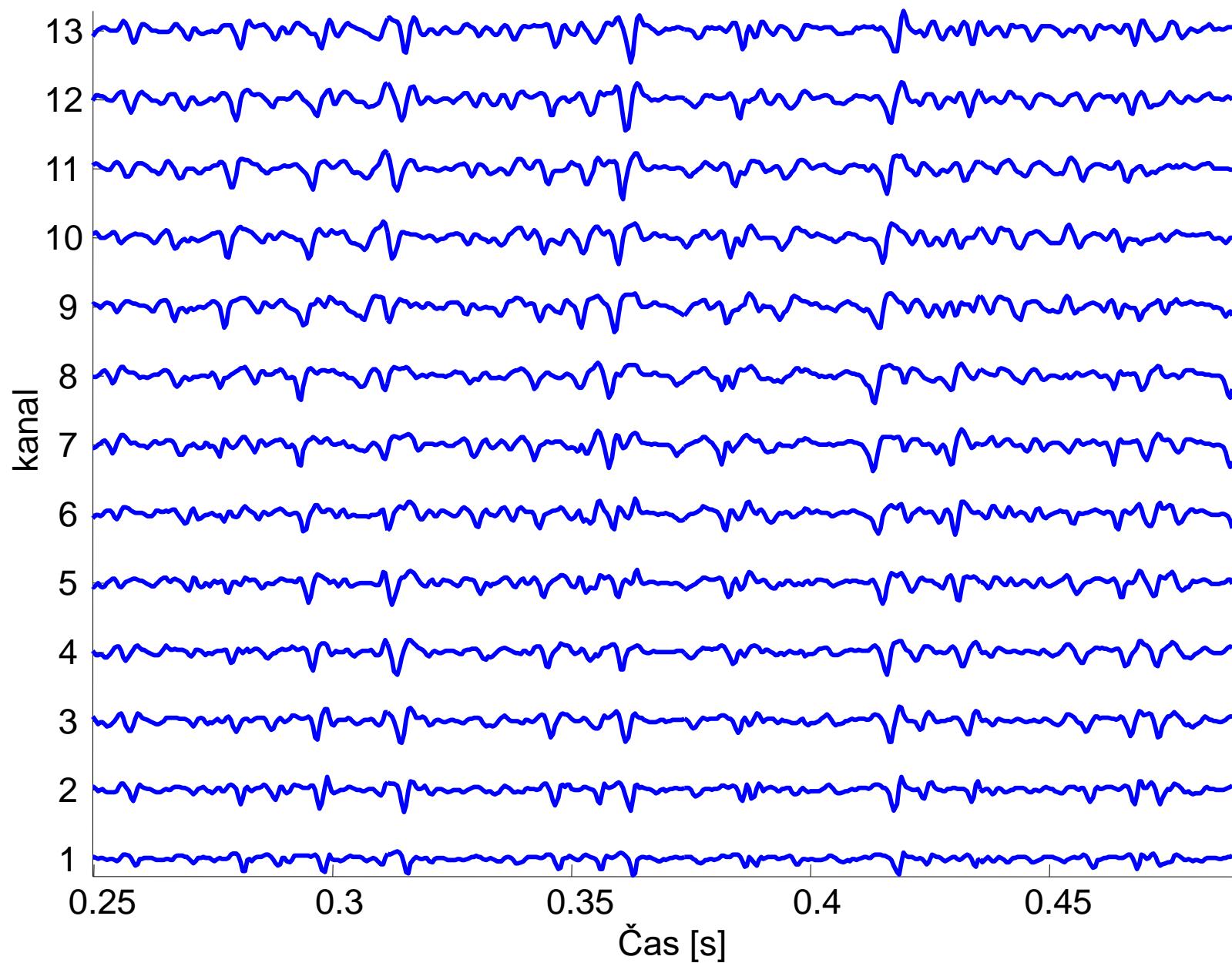
- Nedavni napredek na področju pridobivanja podatkov je povzročil ogromno povečanje števila in dolžine empiričnih signalov.
- Skrbno načrtovanje eksperimentov je nadomestila “off-line” analiza posnetih podatkov.
- Prekletstvo dimenzij:
 - velika računska zahtevnost
 - velika stopnja redundance
 - prisotnost šuma
- Pomembne izboljšave v obdelavi signalov lahko dosežemo tako, da najprej podatke preslikamo v prostor z manj dimenzijami.

Primer: 65-kanalni površinski EMG

(dvodimenzionalno polje elektrod 13x5)



Primer: površinski EMG (centralni stolpec elektrod)



Motivacija

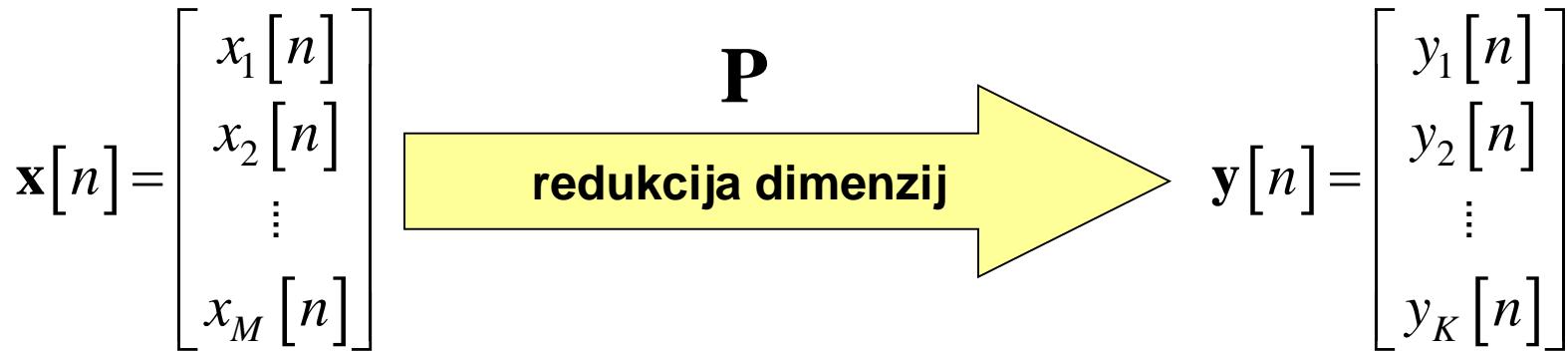
Dana naj bo množica meritev (naključni vektor),

$$\mathbf{x}[n] = \begin{bmatrix} x_1[n] \\ x_2[n] \\ \vdots \\ x_M[n] \end{bmatrix} \quad n = 1, \dots, N$$

n je vzorec signala (meritve) ali poskus (naključni vektorji)

- Kakšna je stopnja redundance v $\mathbf{x}[n]$?
- Ali lahko zmanjšamo dimenzionalnost podatkov na takšen način, da ohranimo čim več informacij o varianci (energiji) prvotnega nabora podatkov? Na kakšen način?

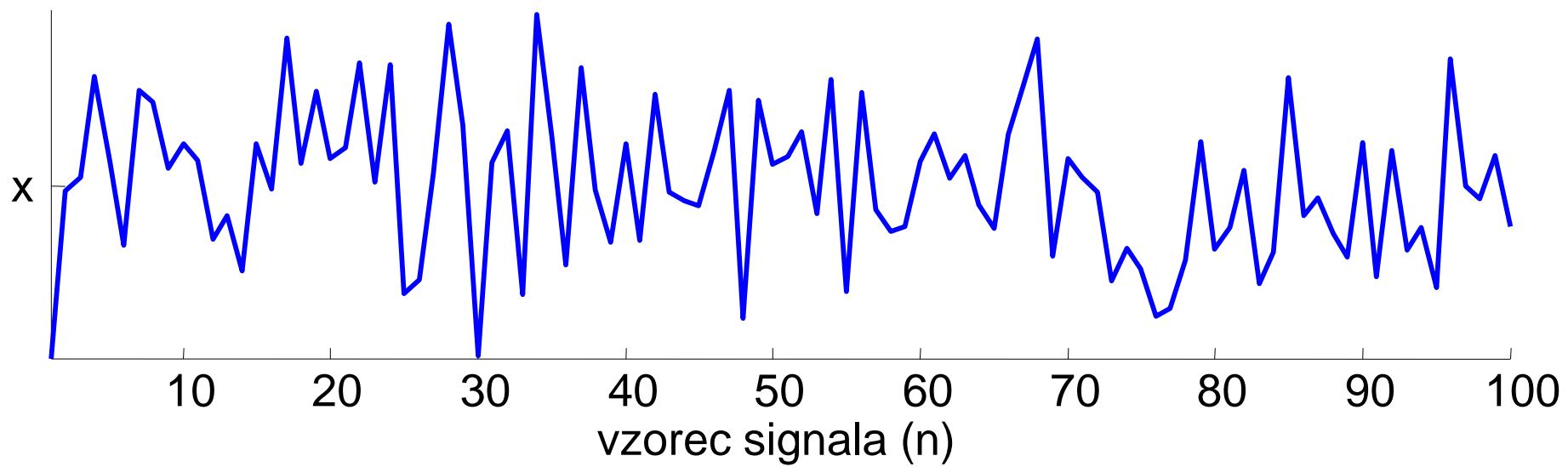
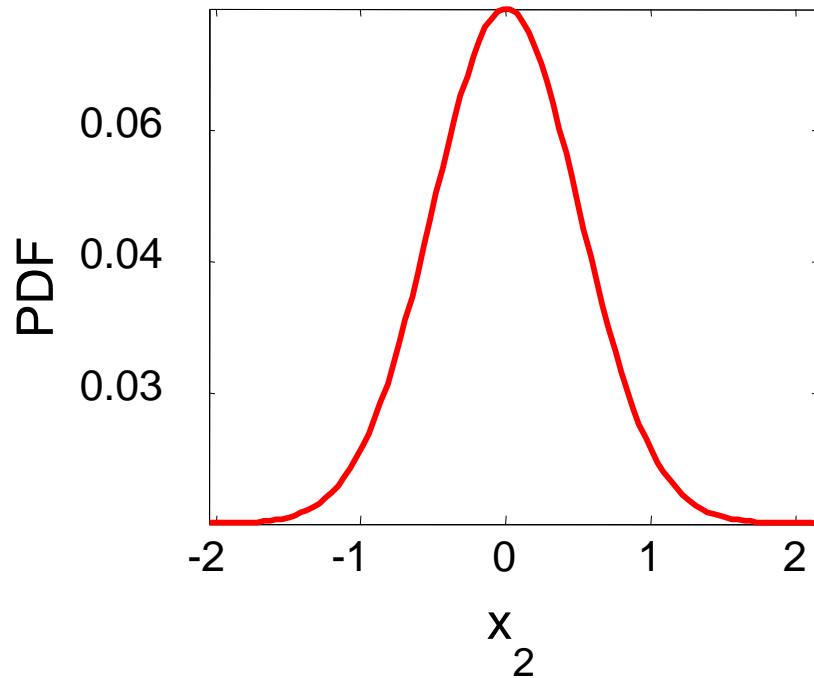
Motivacija



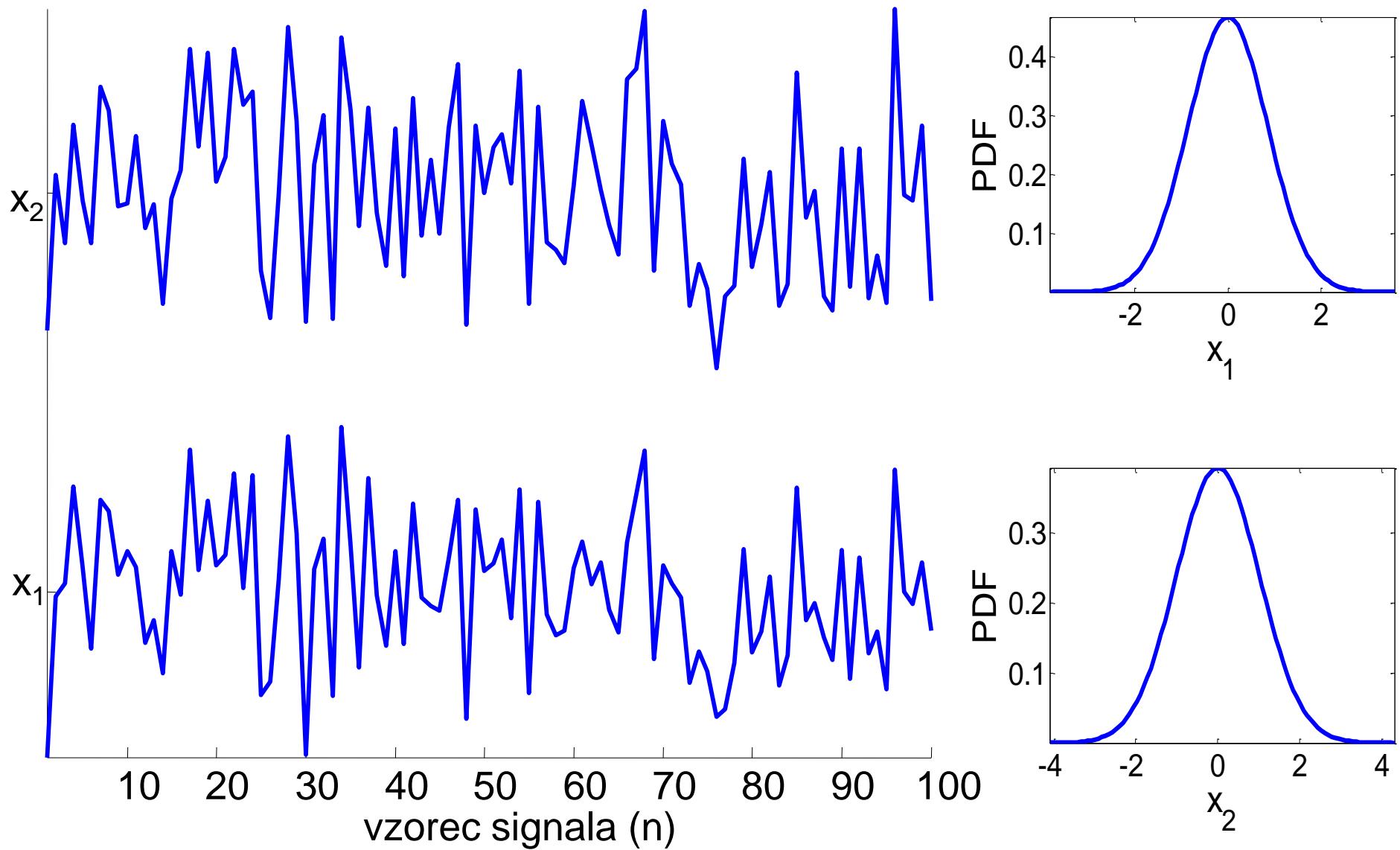
$$K \ll M$$

- Katera linearna transformacija \mathbf{P} je optimalna (v okviru omejitev ohranjanja variance)?
- Kakšno napako napravimo pri tem?

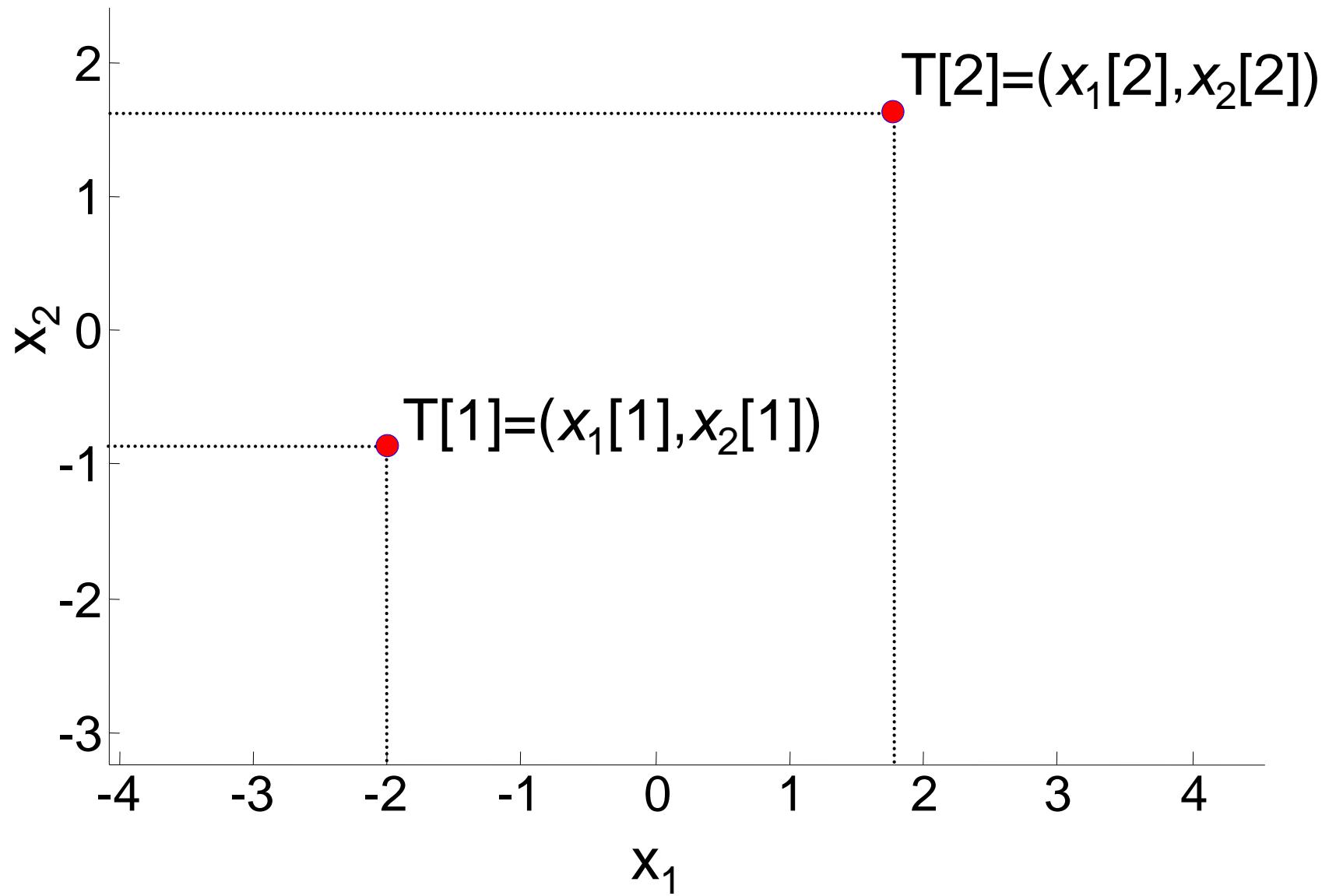
Primer 1: naključne meritve



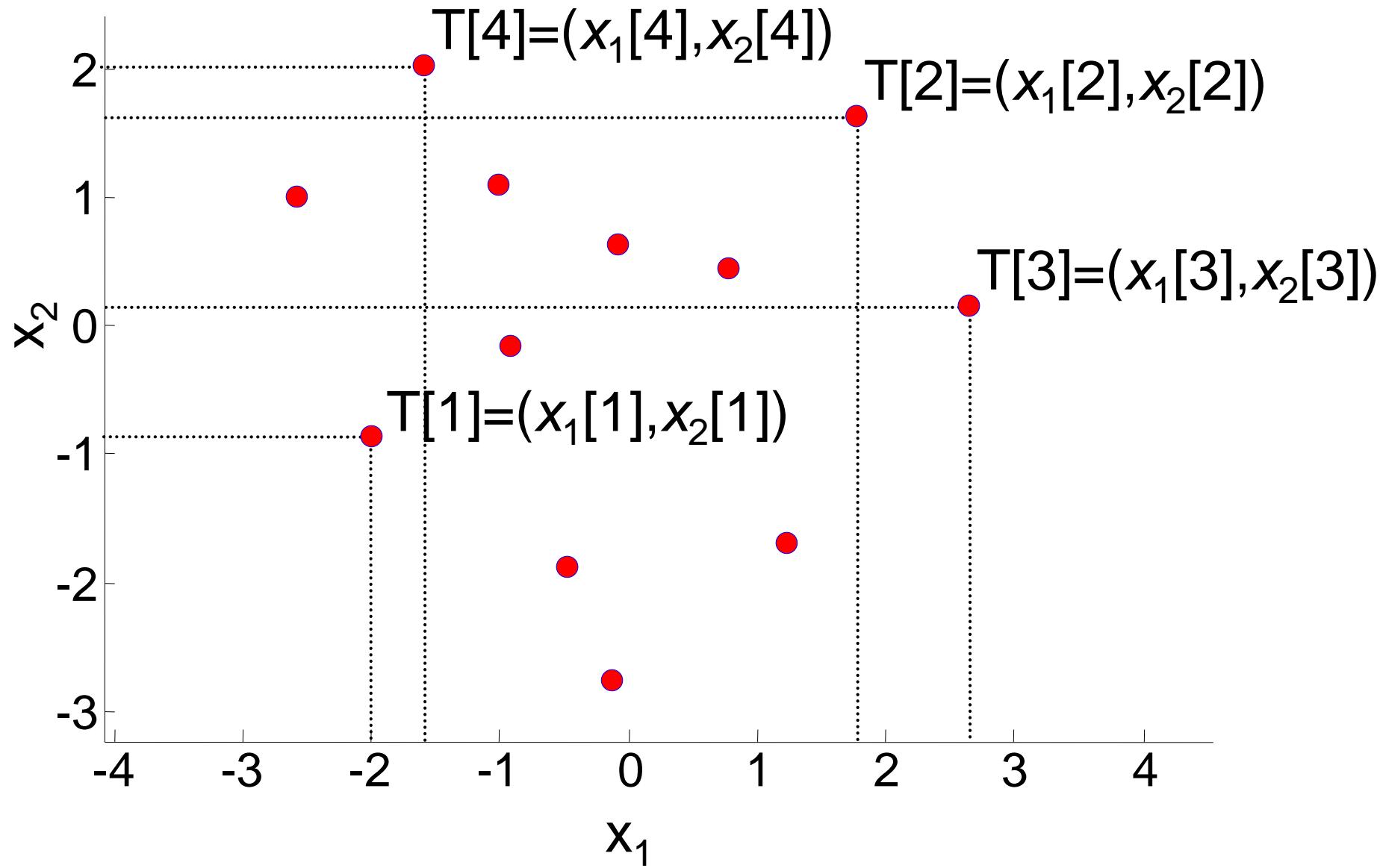
Primer 1: dve naključni meritvi



Upodobitev v skupnem vektorskem prostoru

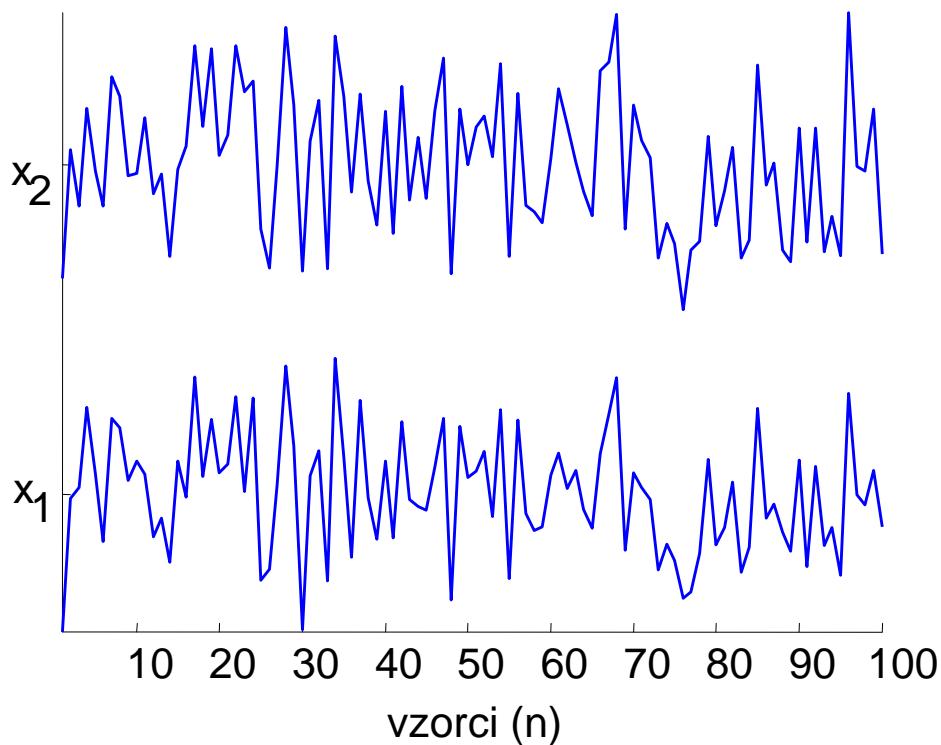


Upodobitev v skupnem vektorskem prostoru

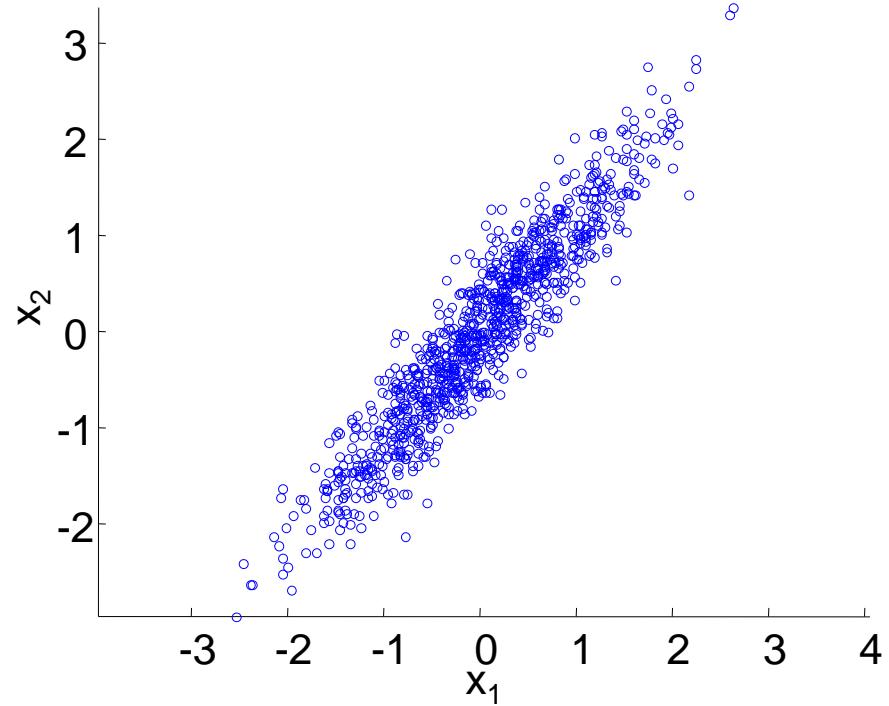


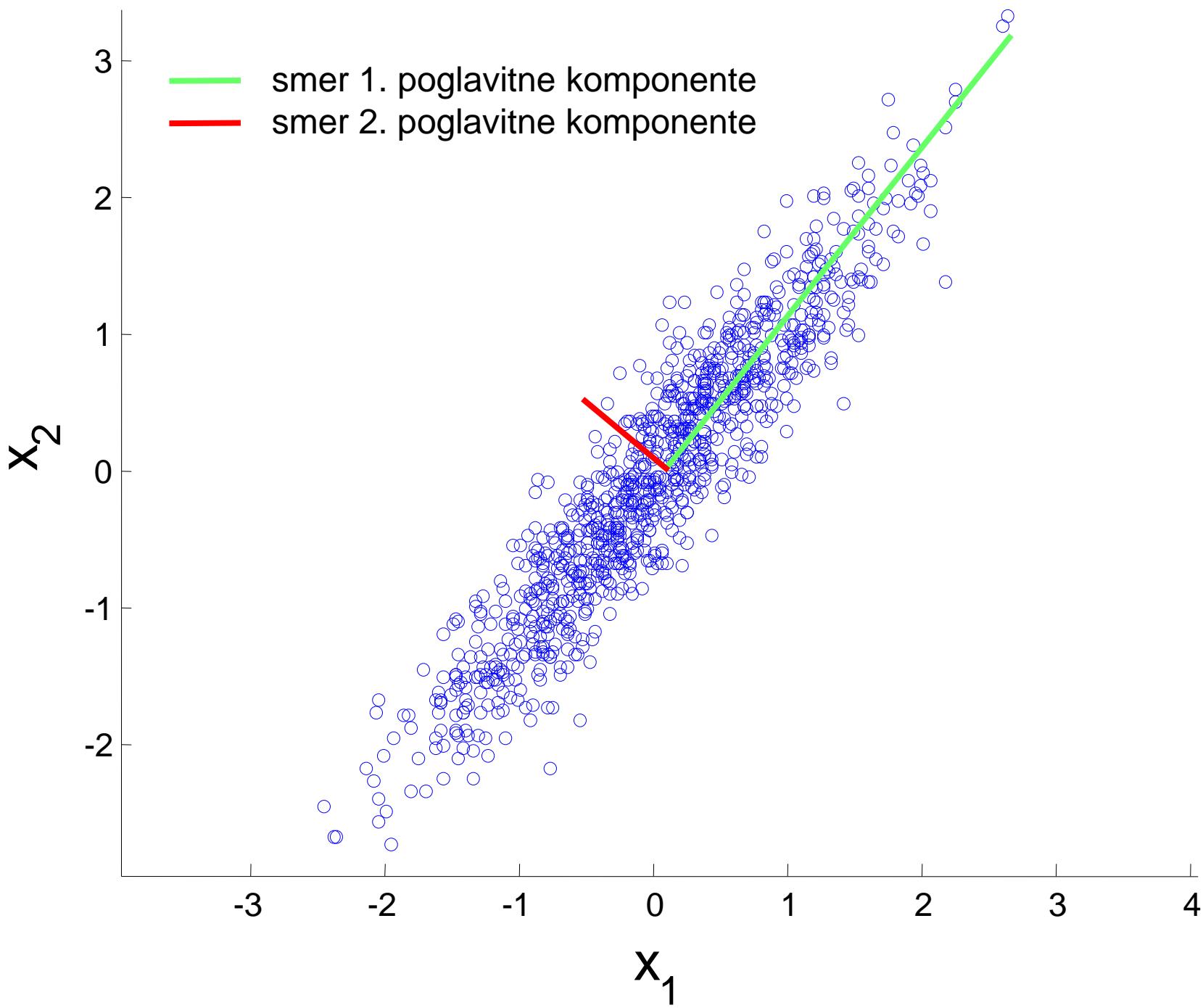
Primer 1: dve naključni meritvi

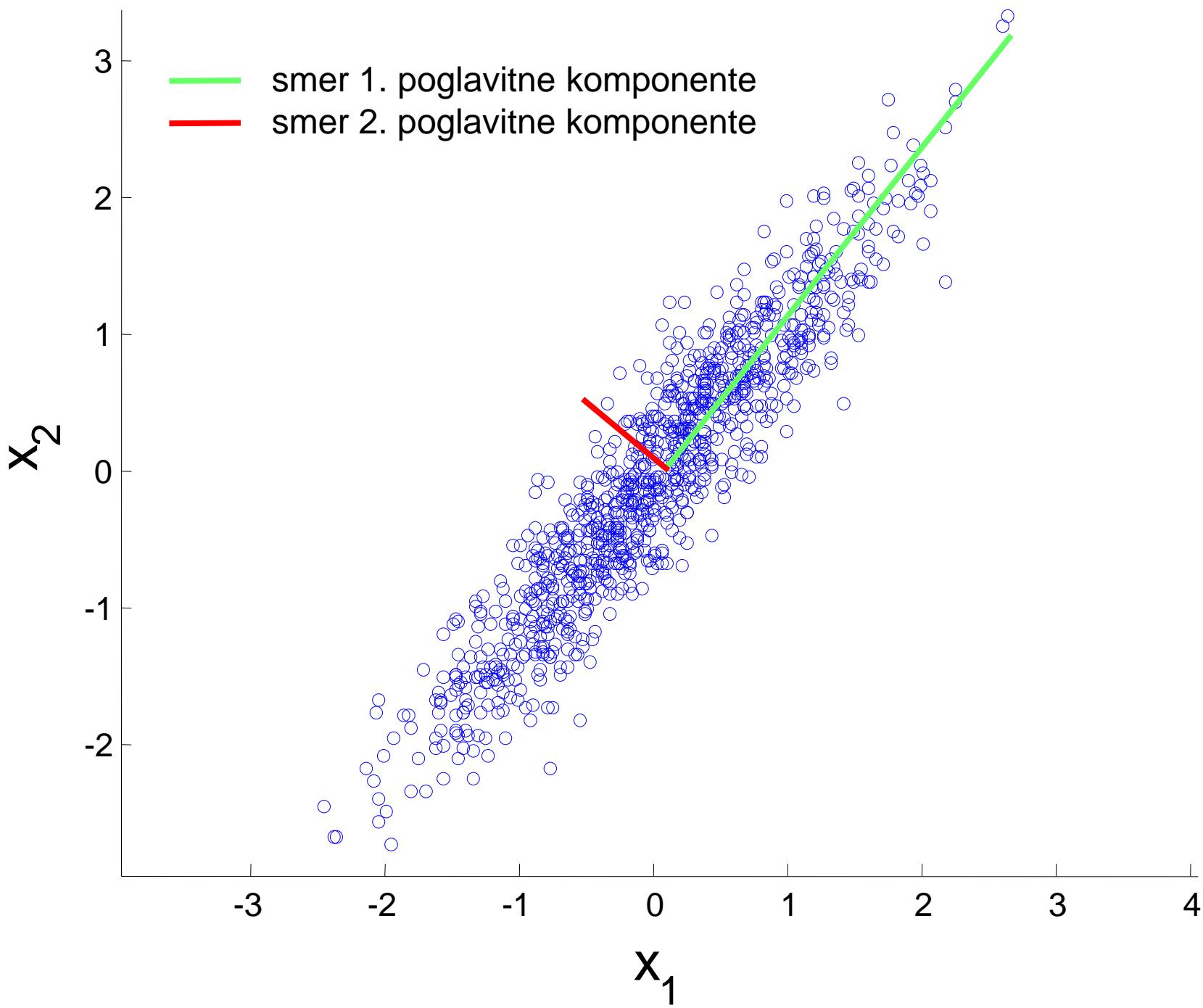
časovna domena



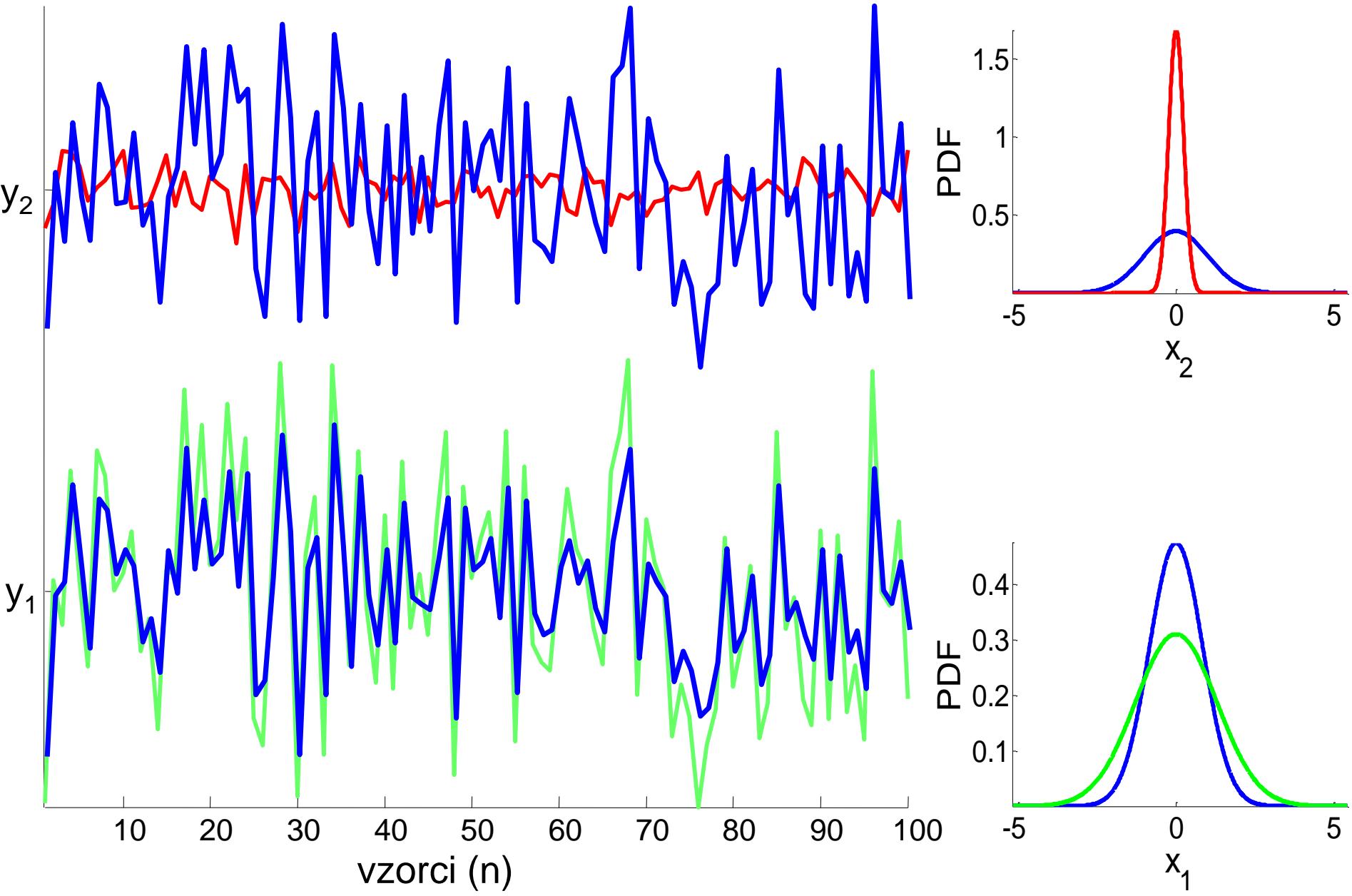
skupni vektorski prostor



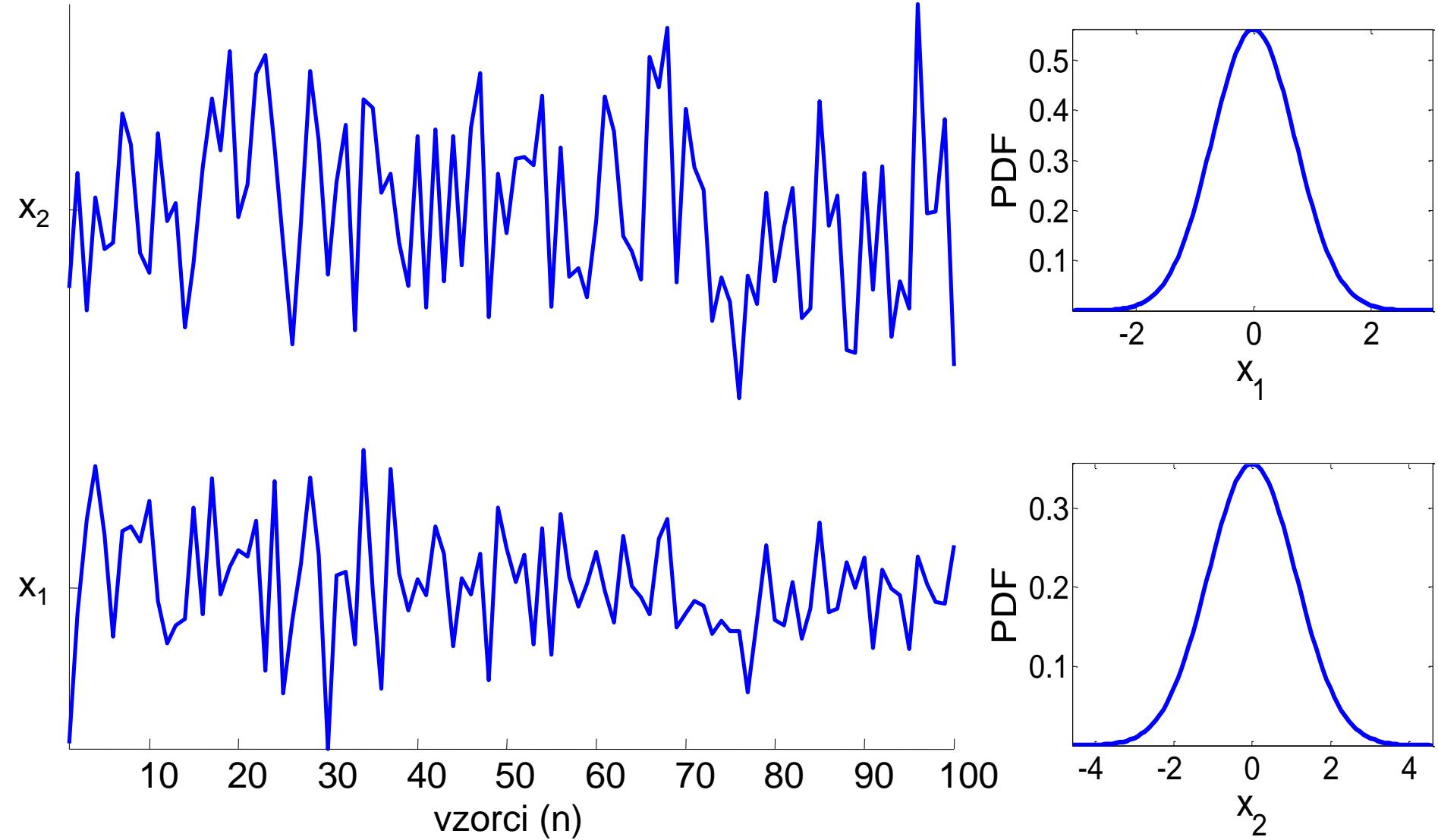




Primer 1: dve naključni meritvi

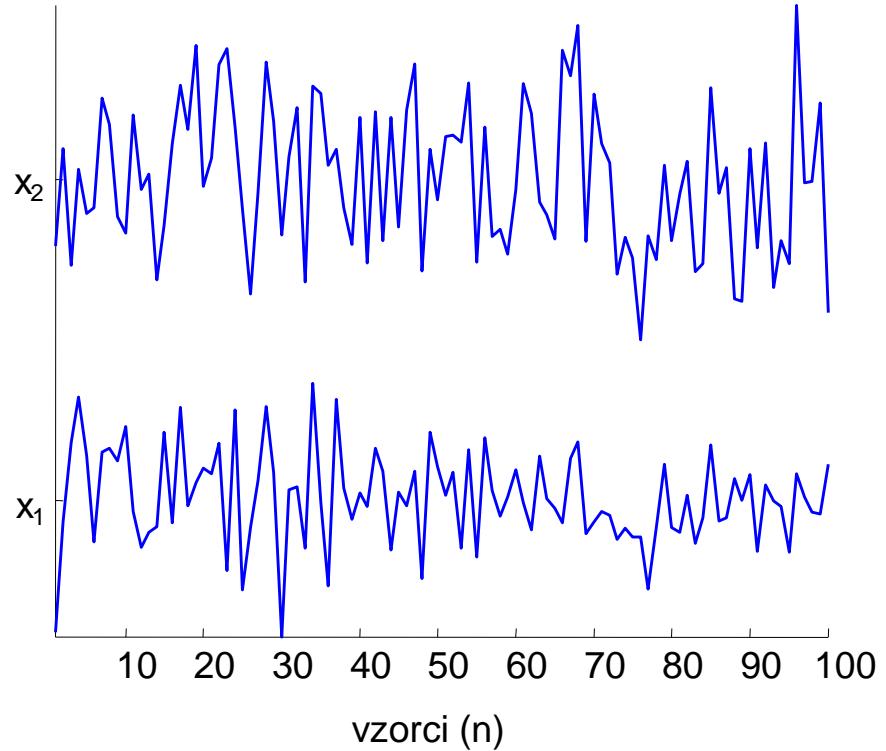


Primer 2 : drugi dve naključni meritvi

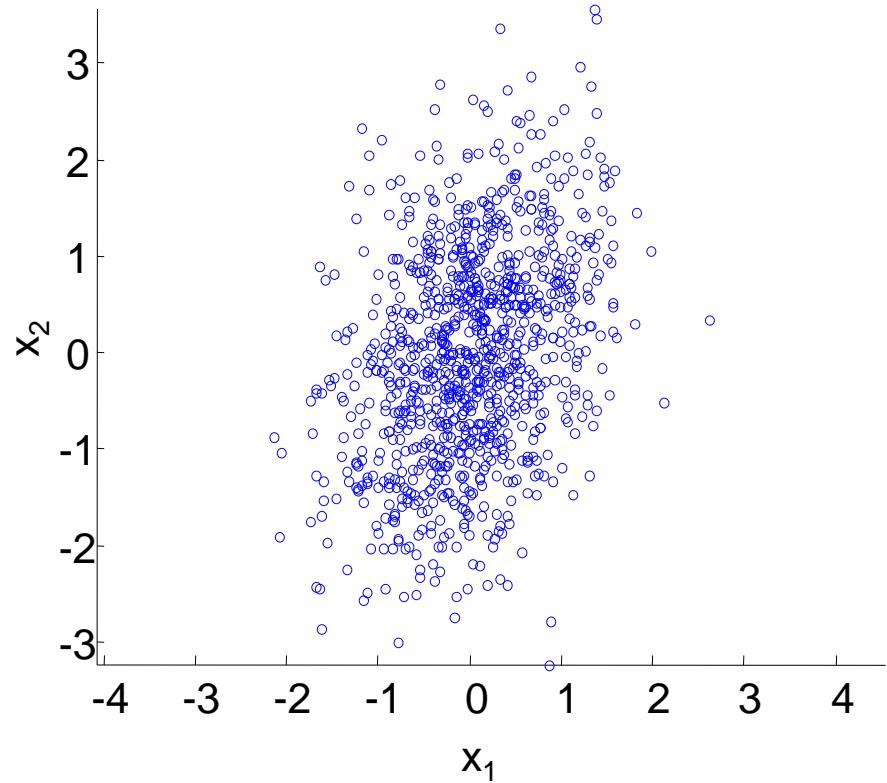


Primer 2: naključni meritvi

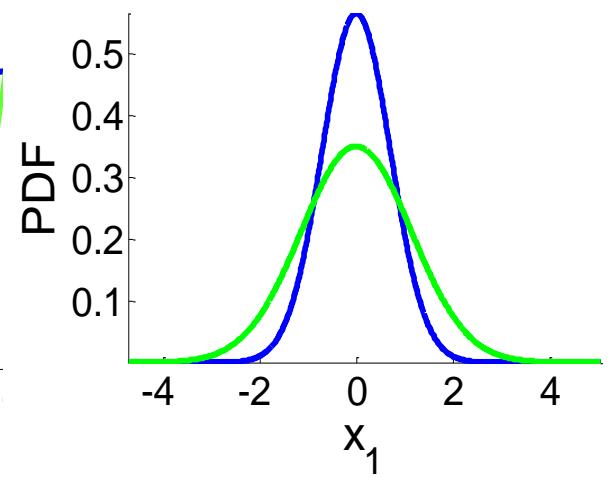
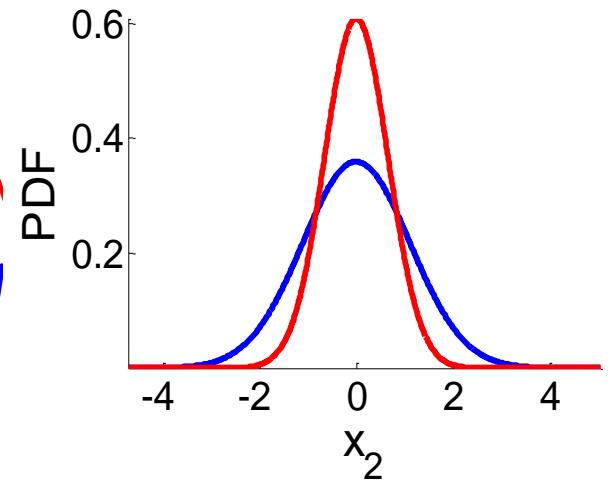
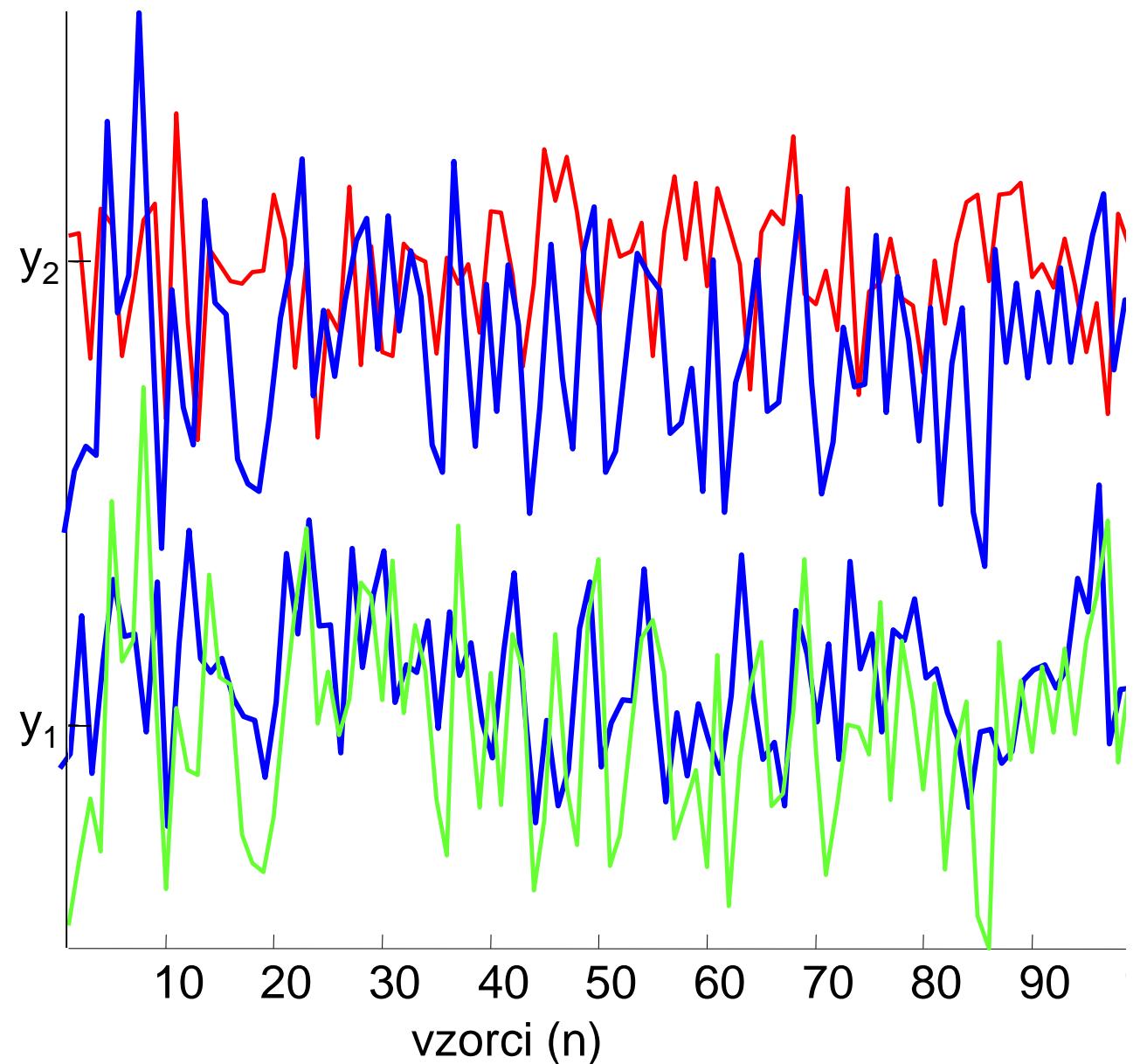
časovna domena



skupen vektorski prostor



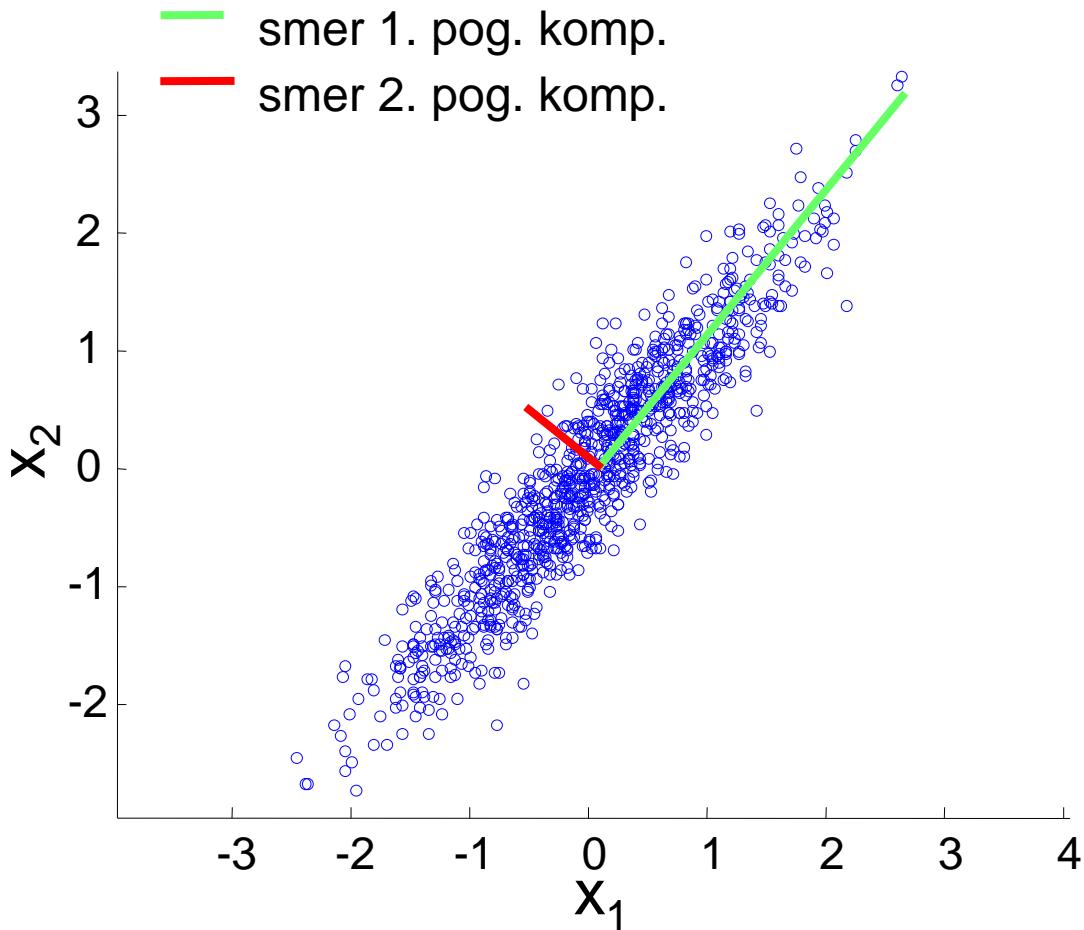
Primer 2: naključni spremenljivki



Naloge in cilji PCA

- Ali obstaja baza prostora, ki je linearna kombinacija prvotno podanih baznih vektorjev (podanih meritev), in je bolj primerna za opis danega nabora podatkov (ob omejitvah ohranjanja variance in pravokotnosti baznih vektorjev)?
- Kakšna je transformacija P , ki preslika dano bazo prostora v novo bazo prostora:
$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{P}\mathbf{x}[n]$$
- Kako lahko določimo to transformacijo?

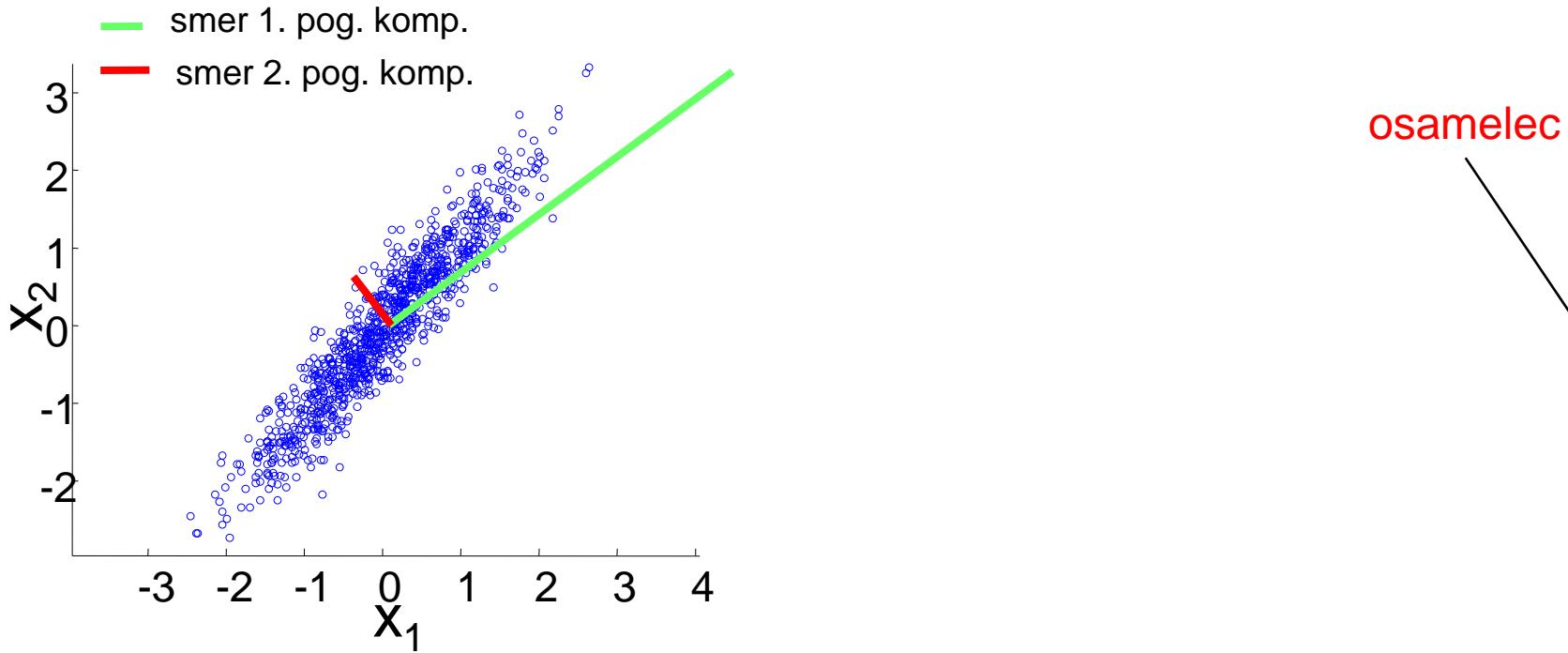
PCA z maksimizacijo variance



- 1. bazni vektor = smer največje variance
- Naj bodo vsi bazni vektorji ortogonalni
- 2. bazni vektor je smer druge največje variance
- itd.

PCA z maksimizacijo variance

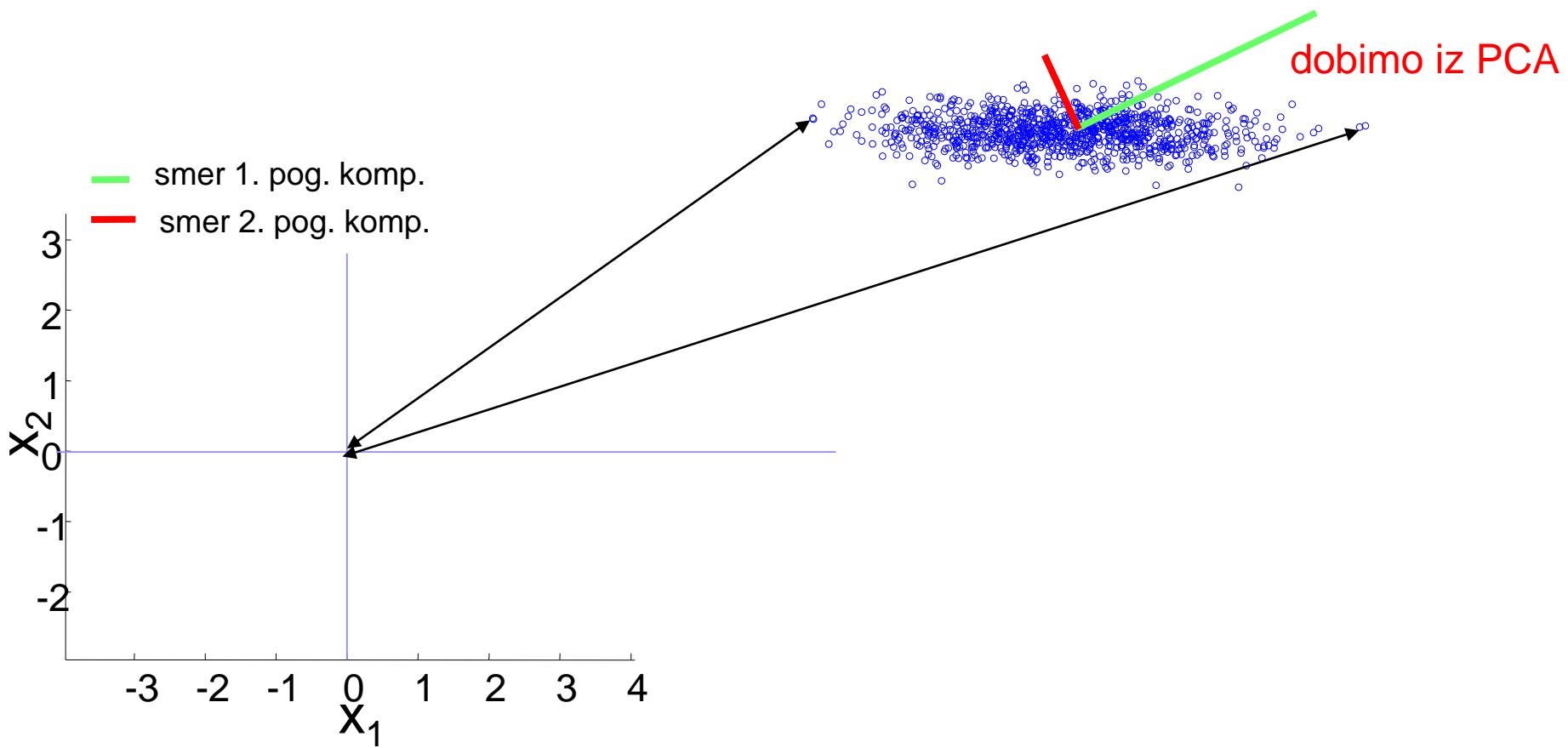
1. PCA je občutljiva na osamelce



PCA z maksimizacijo variance

2. PCA je občutljiva na neničelne povprečne vrednosti meritev

Ne dobimo iz PCA



Korelacijska matrika $\mathbf{x}[n]$

$$\mathbf{C}_{\mathbf{x}} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}[n] \mathbf{x}^T[n] = \begin{bmatrix} c(x_1, x_1) & c(x_1, x_2) & \dots & c(x_1, x_M) \\ c(x_2, x_1) & c(x_2, x_2) & \dots & c(x_2, x_M) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c(x_M, x_1) & c(x_M, x_2) & \dots & c(x_M, x_M) \end{bmatrix}$$

kjer $c(x_i, x_j) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N x_i[n] x_j[n]$

- $c(x_i, x_i)$ meri varianco $x_i \rightarrow$ maksimiziraj $c(y_i, y_i)$
- $c(x_i, x_j)$ meri korelacijo med x_i in $x_j \rightarrow$ minimiziraj $c(y_i, y_j)$

$$c(x_i, x_j) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N x_i[n] x_j[n]$$

$x1 = [-1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1]$
 $x2 = [-1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1]$

$$c(x1, x2) = 1$$

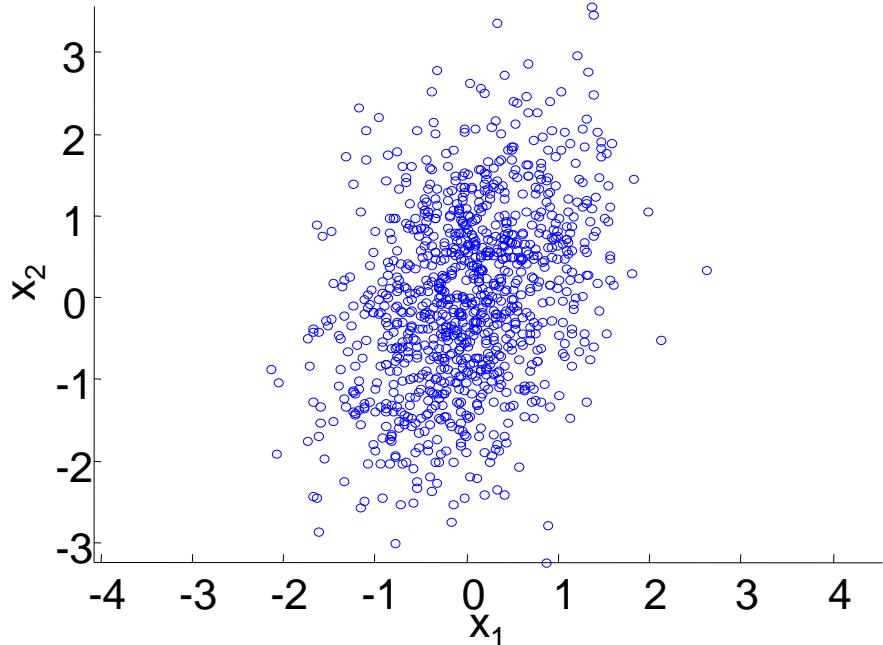
$x1 = [-1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1]$
 $x2 = [1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1]$

$$c(x1, x2) = -1$$

$x1 = [-1, 0, 1, 0, -1, 0, 1, 0]$
 $x2 = [0, -1, 0, 1, 0, -1, 0, 1]$

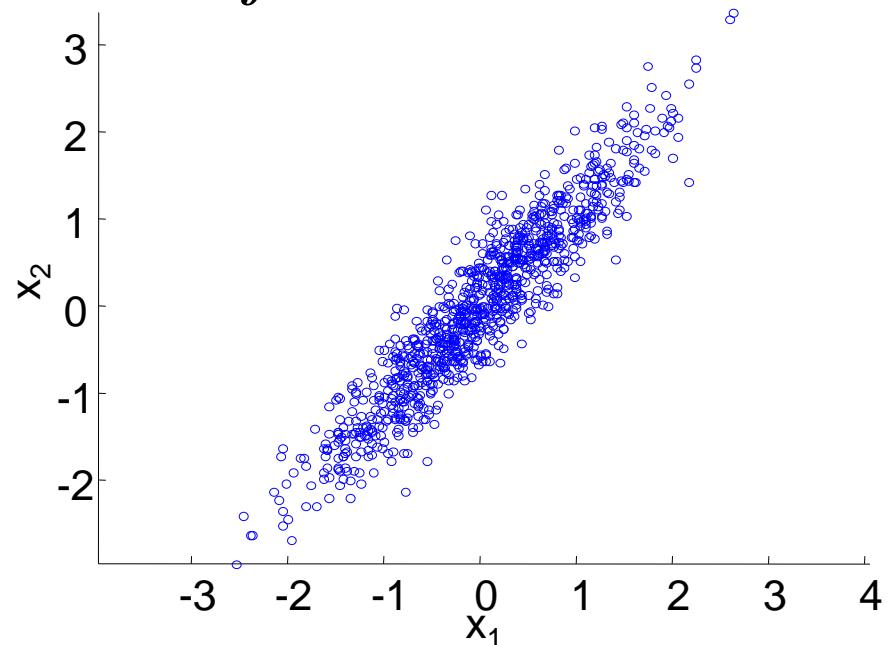
$$c(x1, x2) = 0$$

Prečna korelacija $c(x_i, x_j)$



Nizka redundanca

$$c(x_1, x_2) = 0.33$$



Visoka redundanca

$$c(x_1, x_2) = 0.90$$

Prečna korelacija meri redundanco!



minimiziraj $c(y_i, y_j)$!

Linearna transformacija \mathbf{P}

- Poiščimo ortogonalno linearno transformacijo \mathbf{P} , tako da bo $\mathbf{y}[n] = \mathbf{Px}[n]$ in bo

$$\mathbf{C}_y = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \mathbf{y}^T[n] \mathbf{y}[n]$$

diagonalna matrika.

- Z drugimi besedami, diagonalizirajmo korelacijsko matriko meritev \mathbf{C}_x

Linearna transformacija \mathbf{P}

$$\begin{aligned}\mathbf{C}_y &= \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \mathbf{y}[n] \mathbf{y}^T[n] \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \mathbf{Px}[n] (\mathbf{Px}[n])^T \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \mathbf{Px}[n] \mathbf{x}^T[n] \mathbf{P}^T \\ &= \mathbf{P} \mathbf{C}_x \mathbf{P}^T\end{aligned}$$

Linearna transformacija \mathbf{P}

- \mathbf{C}_x je simetrična matrika. Diagonalizira jo ortonormalna matrika njenih lastnih vektorjev (\mathbf{E}):

$$\mathbf{C}_x = \mathbf{E} \mathbf{D} \mathbf{E}^T$$

kjer je:

- \mathbf{D} diagonalna matrika lastnih vrednosti λ_i matrike \mathbf{C}_x . Brez izgube splošnosti lahko privzamemo, da so lastne vrednosti $\lambda_i = \mathbf{D}[i,i]$ urejene v padajočem vrstnem redu.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3, \dots, \geq \lambda_M$$

- \mathbf{E} je matrika ustreznih lastnih vektorjev matrike \mathbf{C}_x (lastni vektorji so stolpci matrike \mathbf{E}).

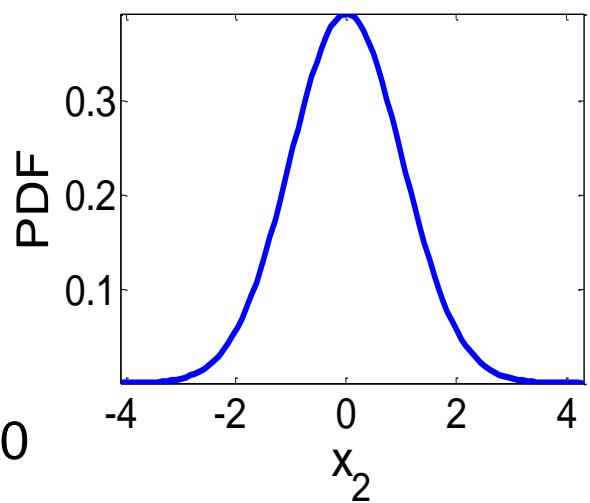
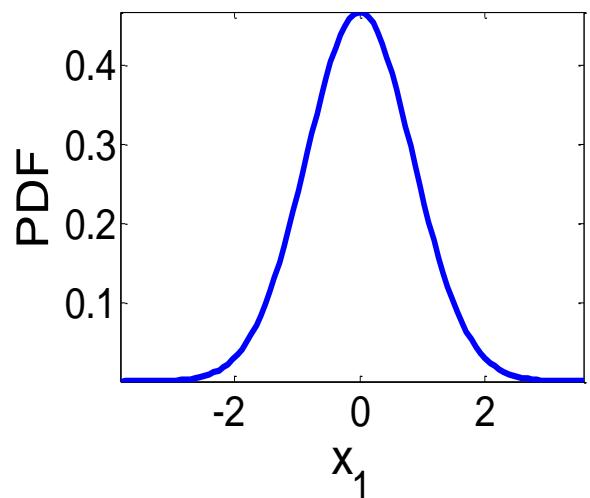
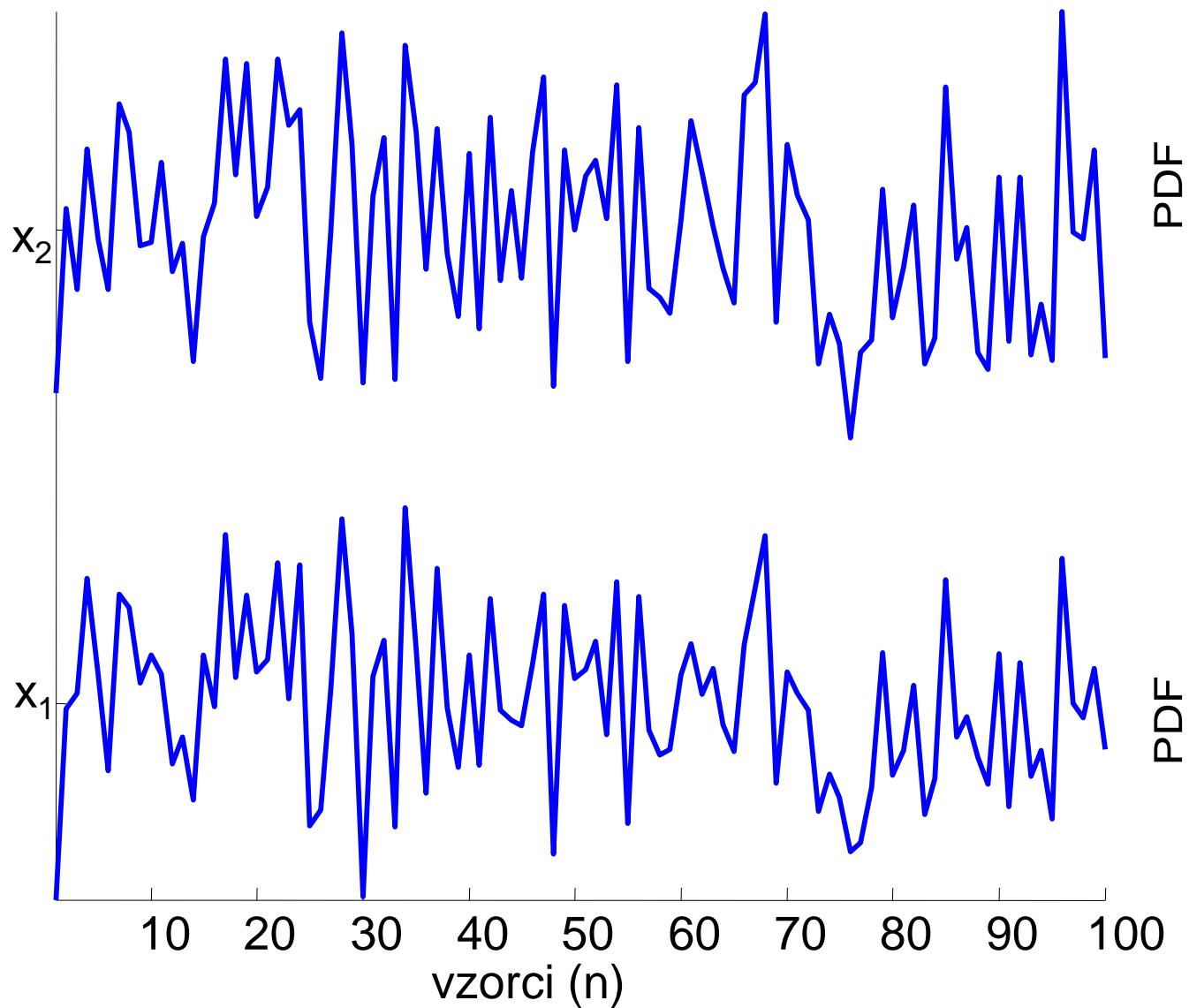
Linearna transformacija \mathbf{P}

- Matematičen trik: izberi $\mathbf{P} = \mathbf{E}^T$

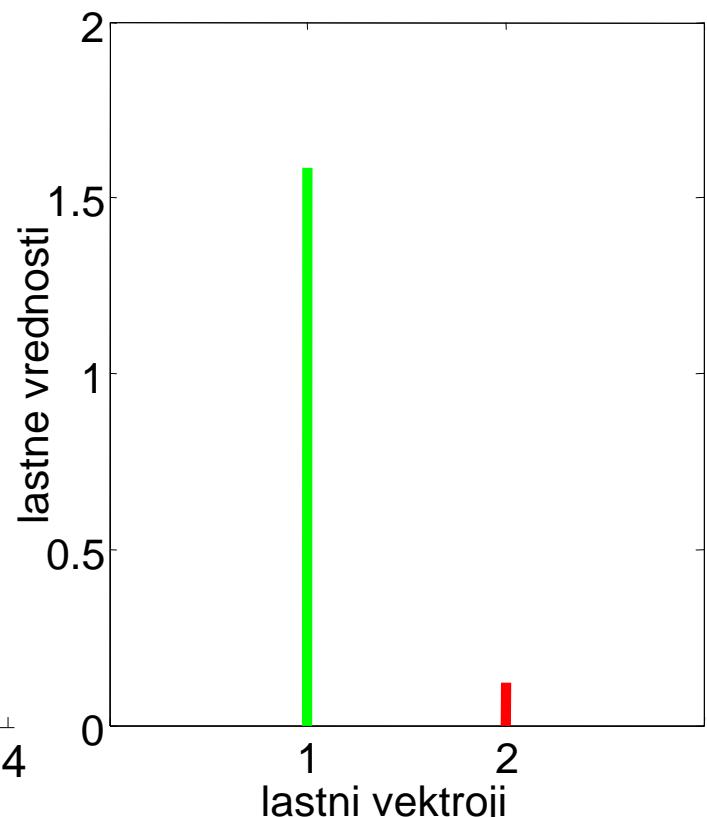
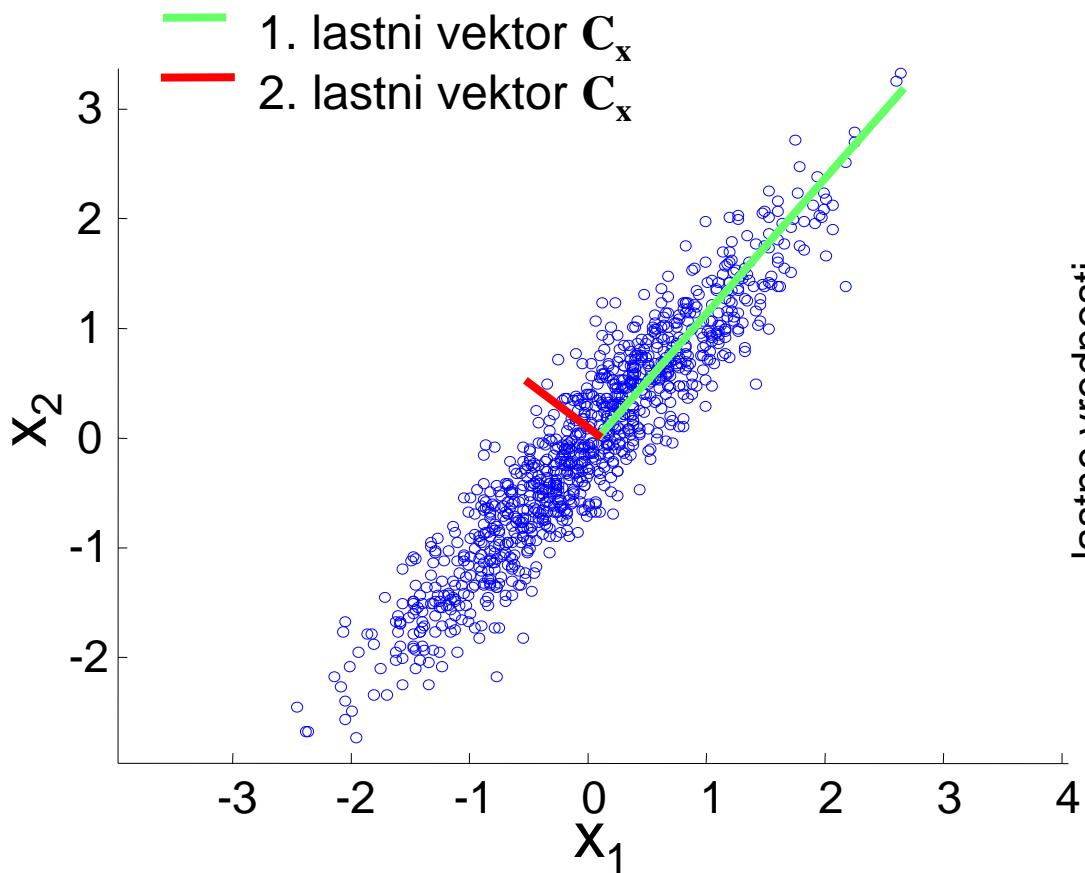
$$\begin{aligned}\mathbf{C}_y &= \mathbf{P} \mathbf{C}_x \mathbf{P}^T \\&= \mathbf{E}^T \mathbf{C}_x \mathbf{E} \\&= \mathbf{E}^T (\mathbf{E} \mathbf{D} \mathbf{E})^T \mathbf{E} \\&= (\mathbf{E}^T \mathbf{E}) \mathbf{D} (\mathbf{E}^T \mathbf{E}) \\&= \mathbf{D}\end{aligned}$$

$$\ker \mathbf{E}^{-1} = \mathbf{E}^T$$

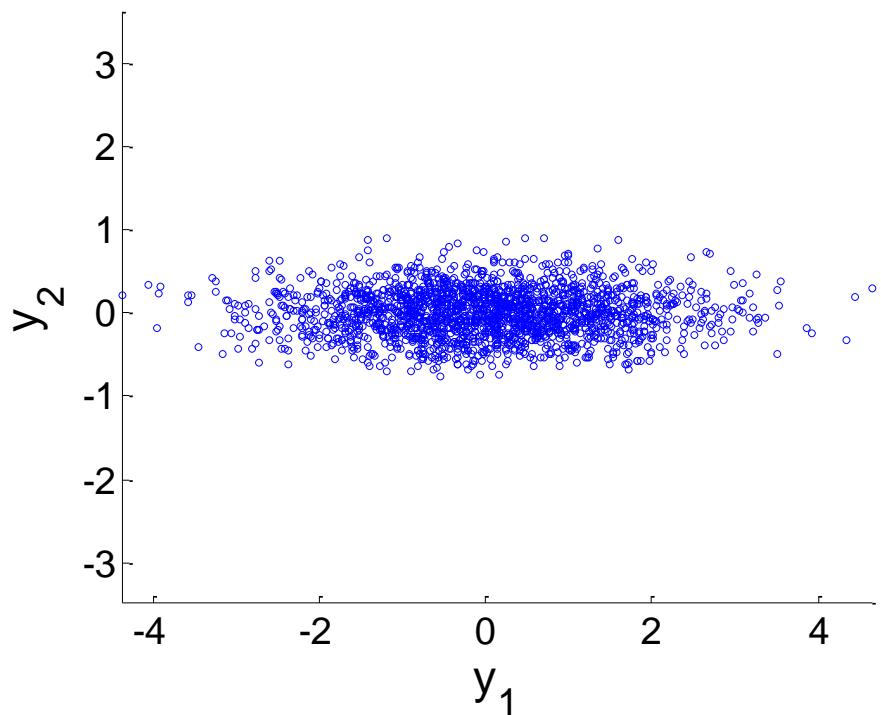
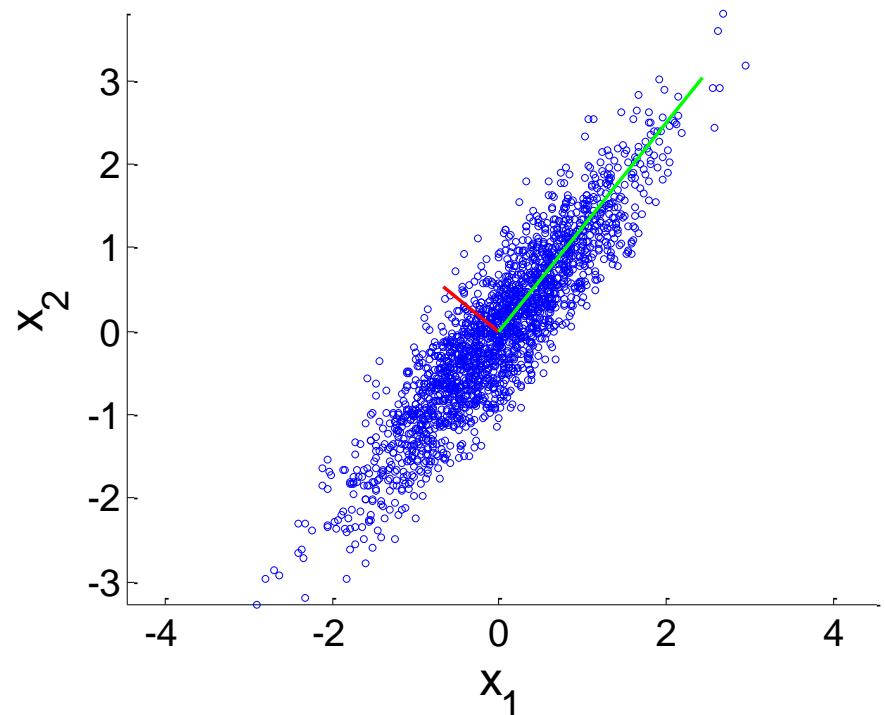
Grafični primer: Primer 1



Grafični primer: Primer 1

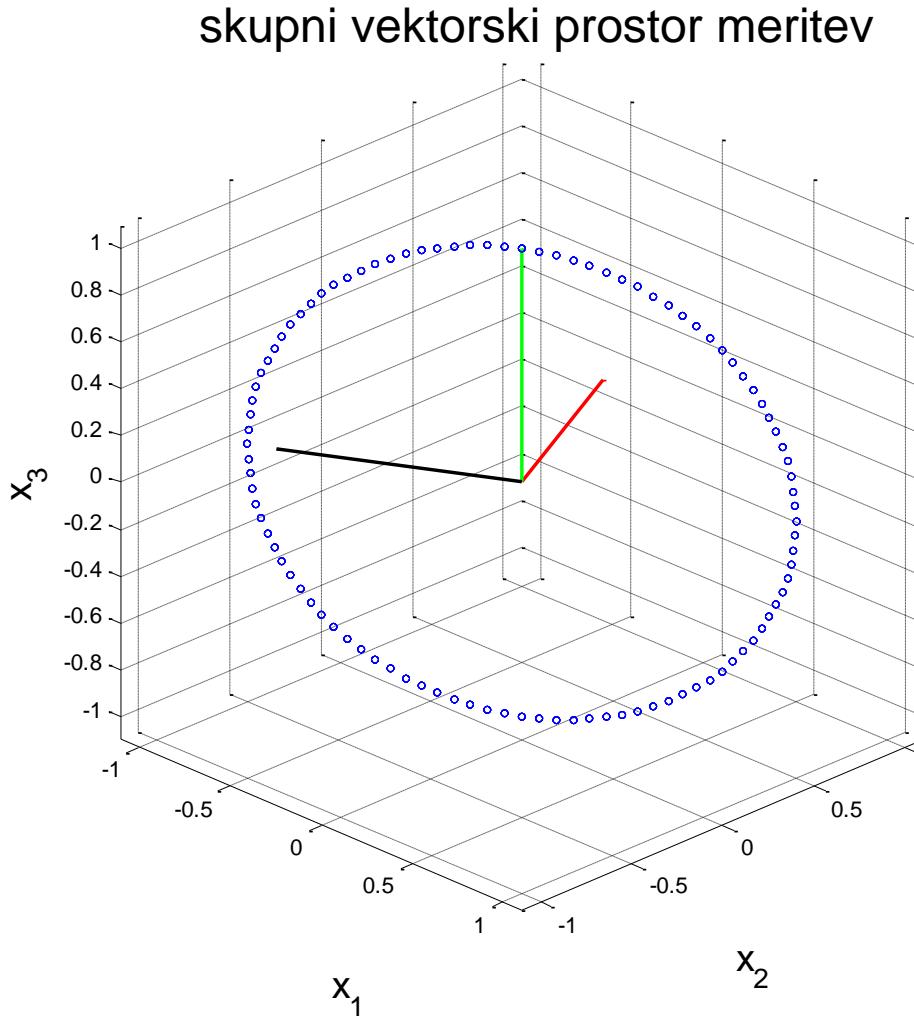
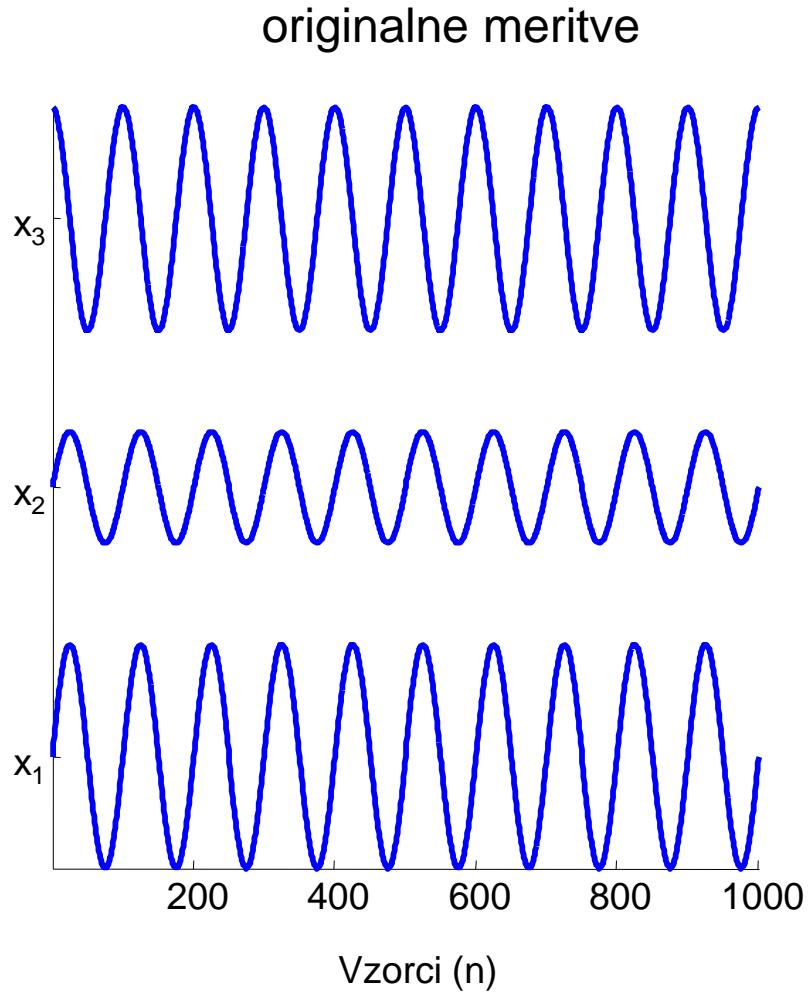


Grafični primer: Primer 1

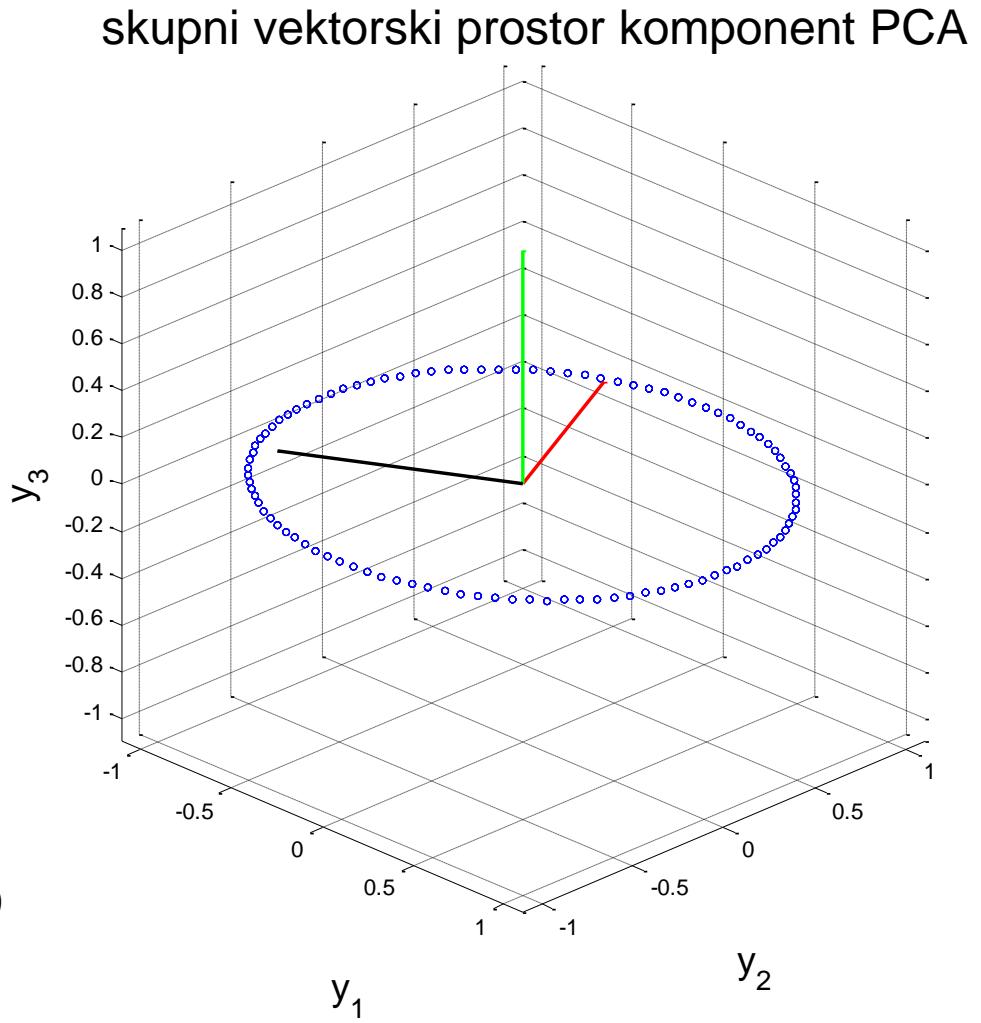
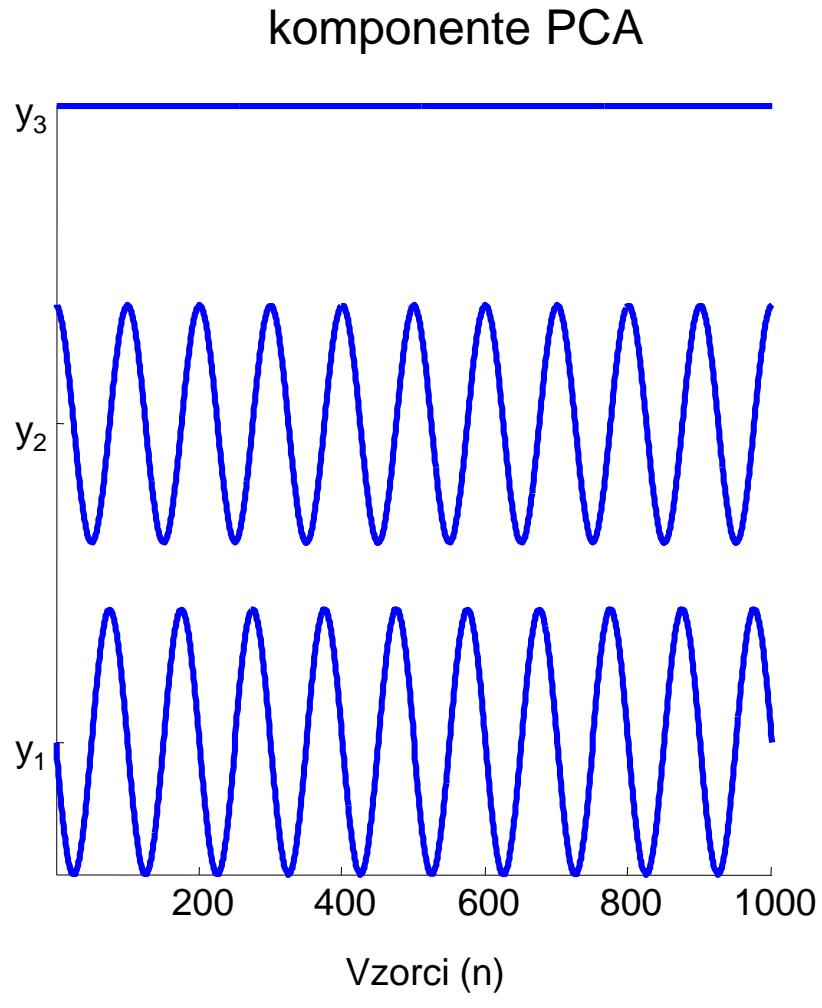


$$E\left\{y_m^2[n]\right\} = E\left\{\mathbf{e}_m^T \mathbf{x}[n] \mathbf{x}^T[n] \mathbf{e}_m\right\} = \mathbf{e}_m^T \mathbf{C}_{\mathbf{x}} \mathbf{e}_m = \lambda_m$$

Primer 3: PCA je lahko zavajajoča



Primer 3: PCA je lahko zavajajoča



Vmesni povzetek

- Smeri poglavitnih komponent meritev $\mathbf{x}[n]$ so določene z lastnimi vektorji korelacijske matrike meritev \mathbf{C}_x .
- i -ta lastna vrednost matrike \mathbf{C}_x določa varianco i -te poglavitne komponente meritev $\mathbf{x}[n]$
- Linearna transformacija (projekcija) meritev na njihove poglavitne komponente:

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{E}^T \mathbf{x}[n]$$

kjer je \mathbf{E} matrika lastnih vrednosti \mathbf{C}_x

Primer 4: sintetični površinski EMG

- simulator površinskega EMG [1]:

- koža: 1 mm
 - podkožno tkivo: 1.5 mm
 - prečni prerez mišice: 16 x 10 mm

- 120 motoričnih enot:

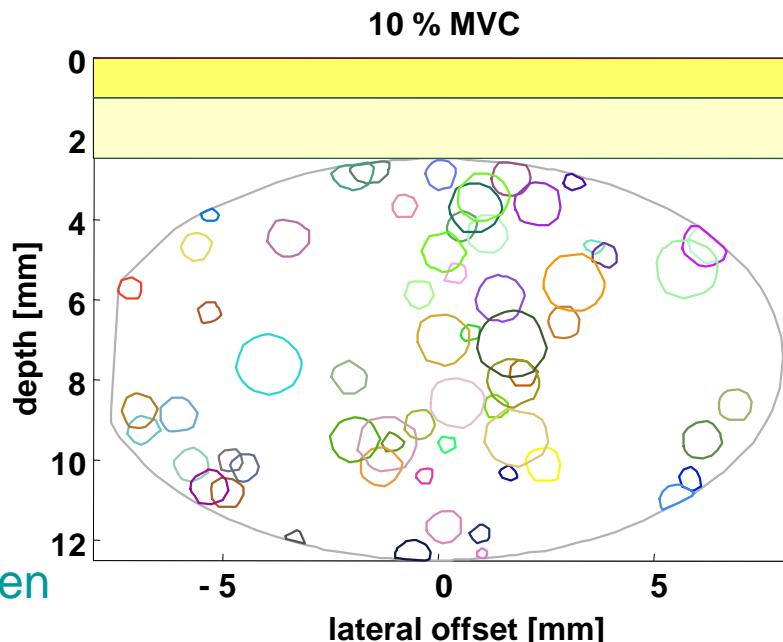
- dolžina vlakna: 50 mm
 - hitrost prevajanja AP: 4 ± 0.3 m/s
 - inervacijsko število: $25 \sim 2500$ vlaken

- Proženja ME [2]:

- vse ME rekrutirane pri 80 % maksimalne prostovoljne skrčitve (MVC)
 - simulirana stopnja skrčitve: 50 % MVC
 - hitrosti proženja simuliranih ME: 8 ~ 35 Hz

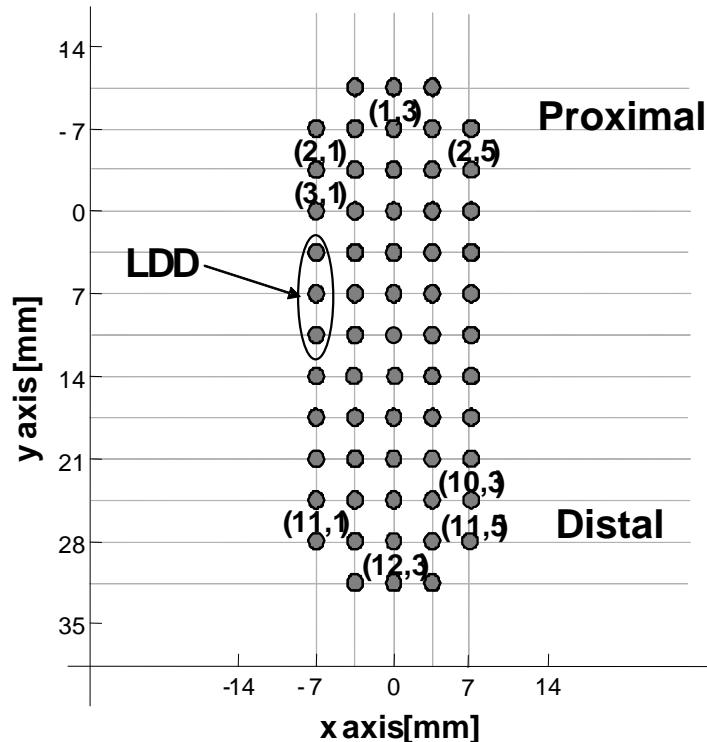
[1] Farina et al. A surface EMG generation model with multilayer cylindrical description of the volume conductor. IEEE Trans Biomed Eng. 2004; 51(3):415-26.

[2] Fuglevand et al. Models of recruitment and rate coding organization in motor unit pools. J. Neurophysiol 1993; 70:2470–88.

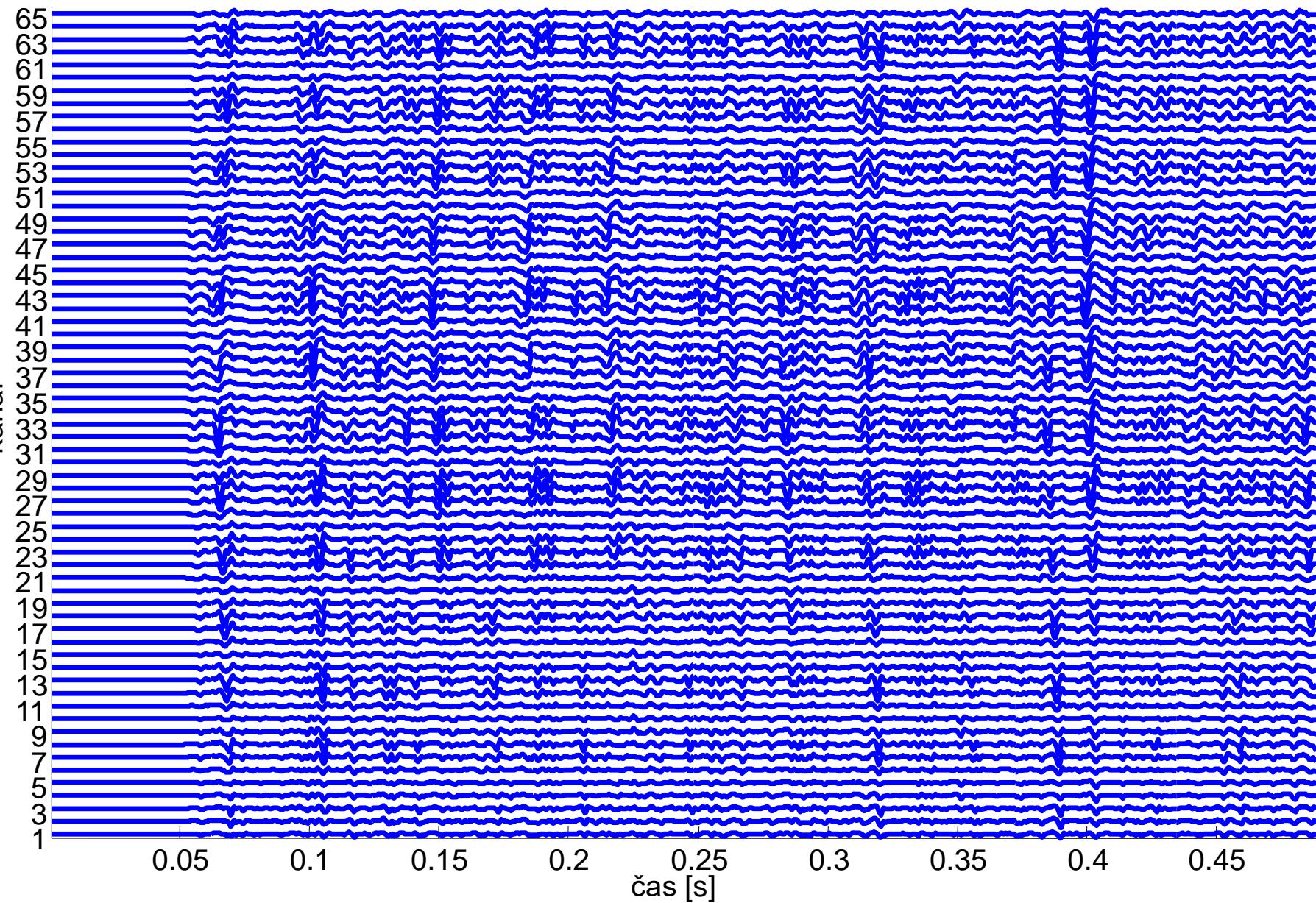


Primer 4: polje elektrod

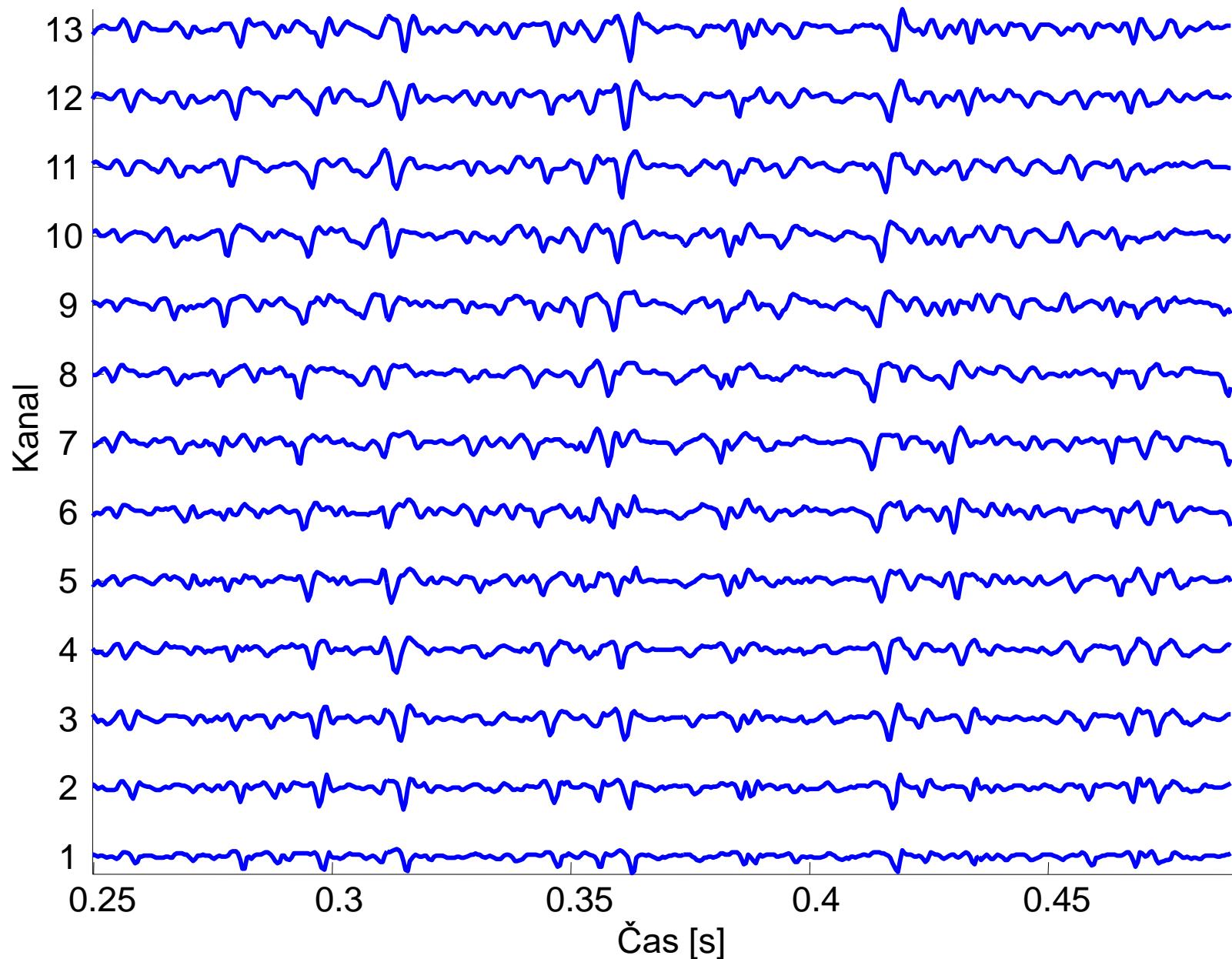
- simulirano polje elektrod:
 - medelektrodná razdalja: 3.5 mm
 - premer elektrod: 1.0 mm
 - št. kanalov: 61
- Snemalna tehnika:
 - vzdolžno dvojno diferenciranje (longitudinal double differential)
 - frekvenca vzorčenja: 1024 Hz
 - dolžina signalov: 20 s
- SNR: brez šuma



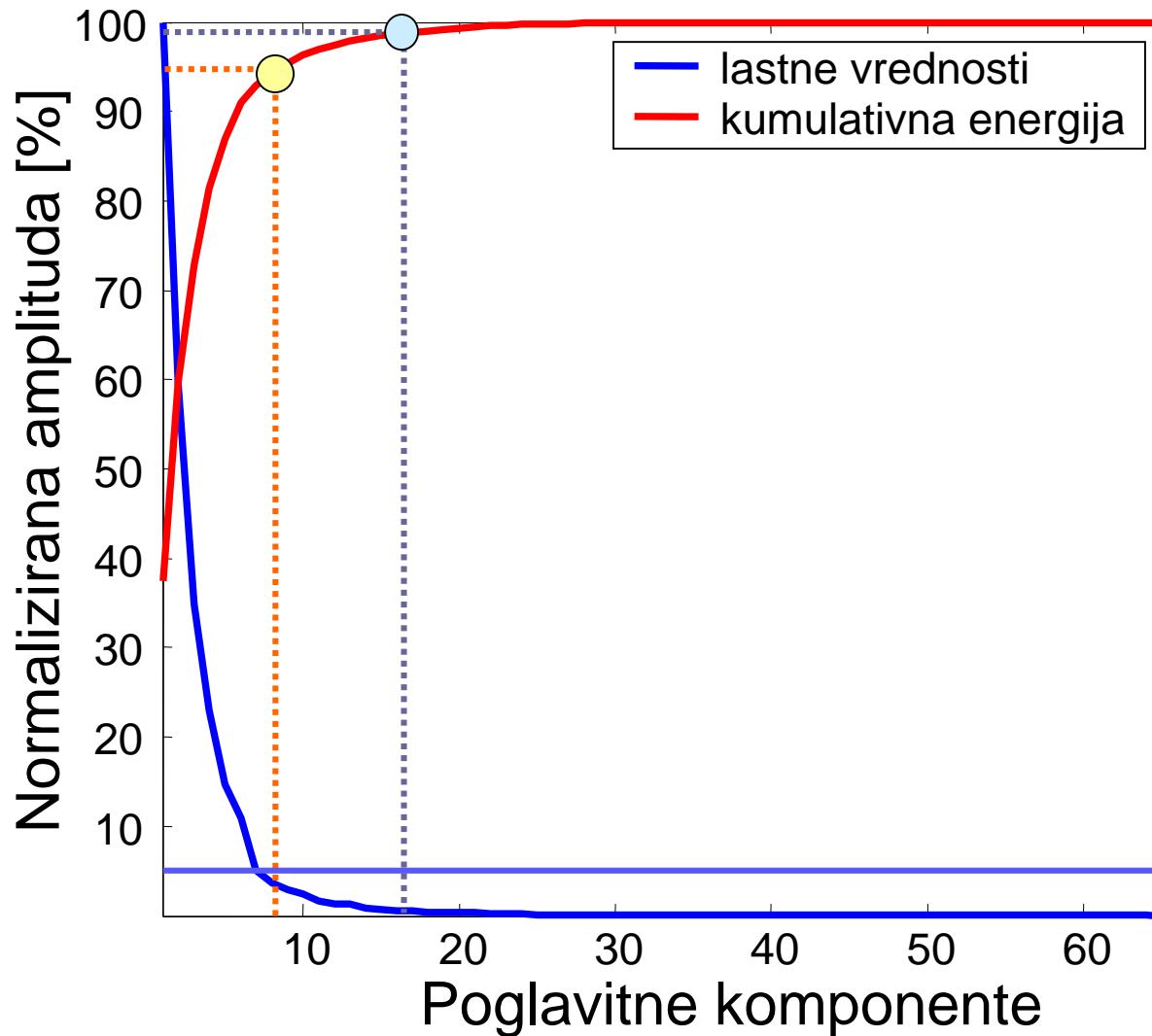
Primer 4: sintetični površinski EMG



Primer 4: sintetični EMG (centralni stolpec elektrod)



Redukcija dimenzij



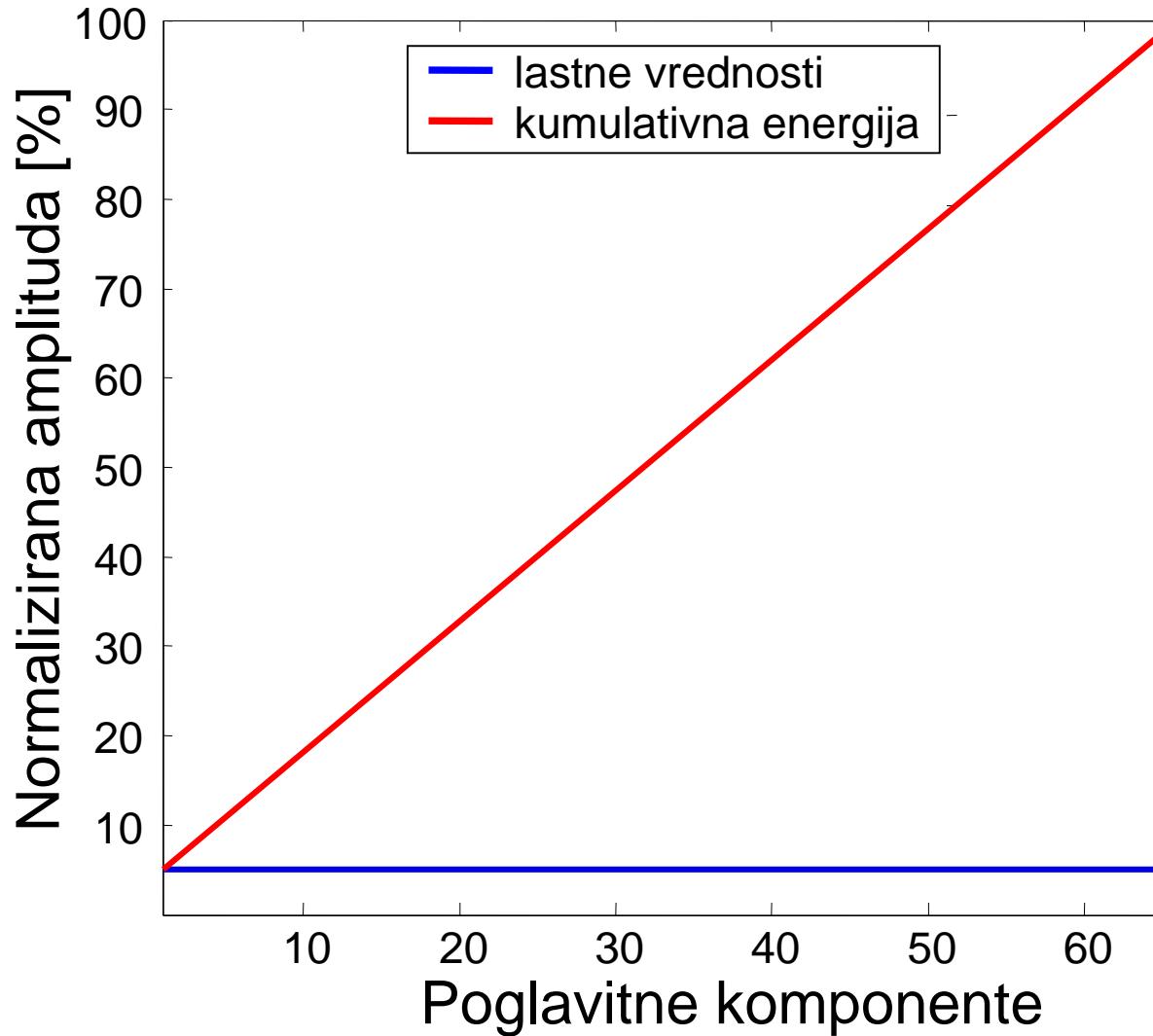
kumulativna energija:

$$E(K) = \frac{\sum_{k=1}^K \lambda_k}{\sum_{m=1}^M \lambda_m}$$

95 % energije je vsebovane v prvih 8 poglavitnih komponentah

99 % energije je vsebovane v prvih 16 poglavitnih komponentah

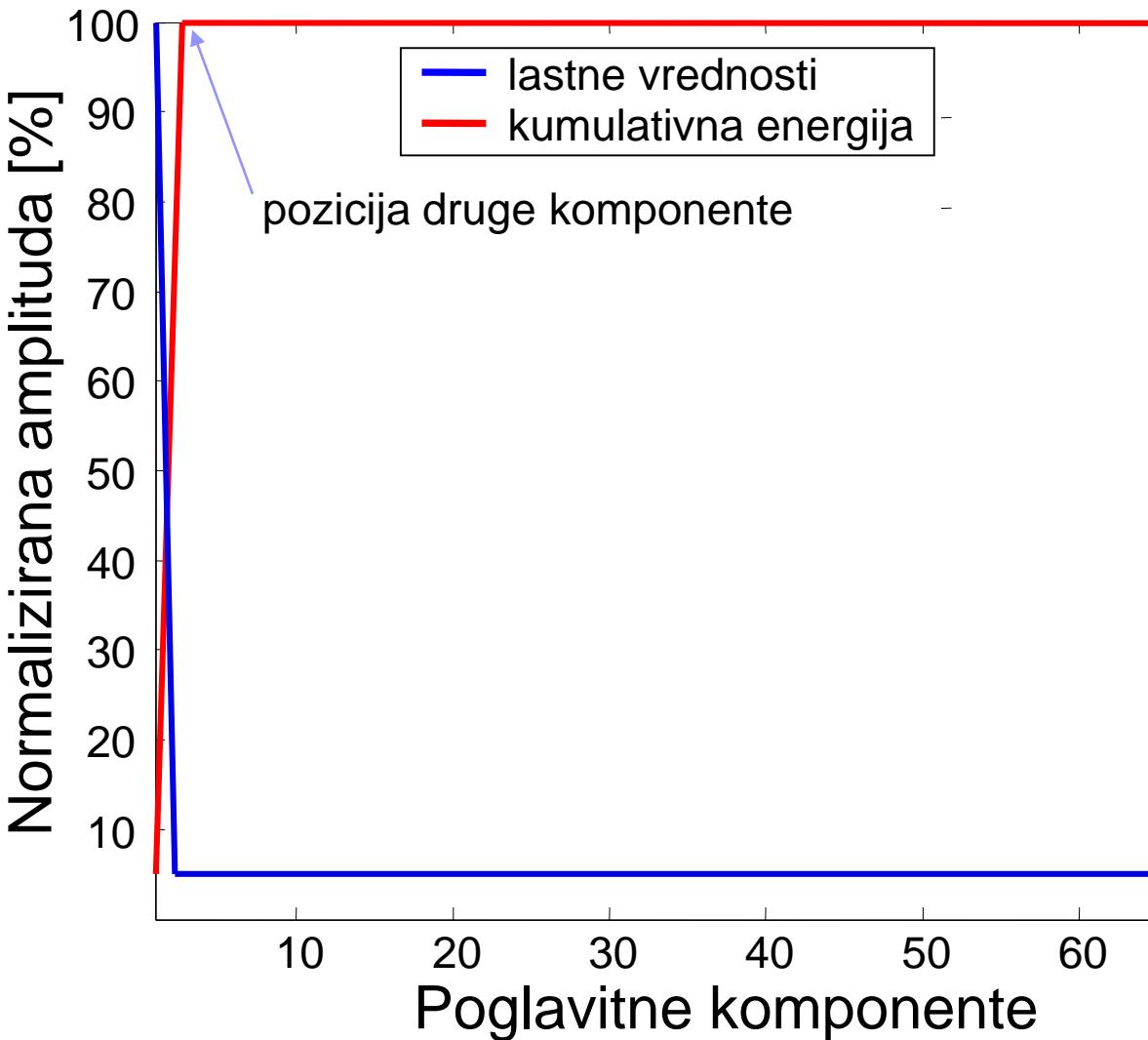
Redukcija dimenzij – najslabši primer za PCA



kumulativna energija:

$$E(K) = \frac{\sum_{k=1}^K \lambda_k}{\sum_{m=1}^M \lambda_m}$$

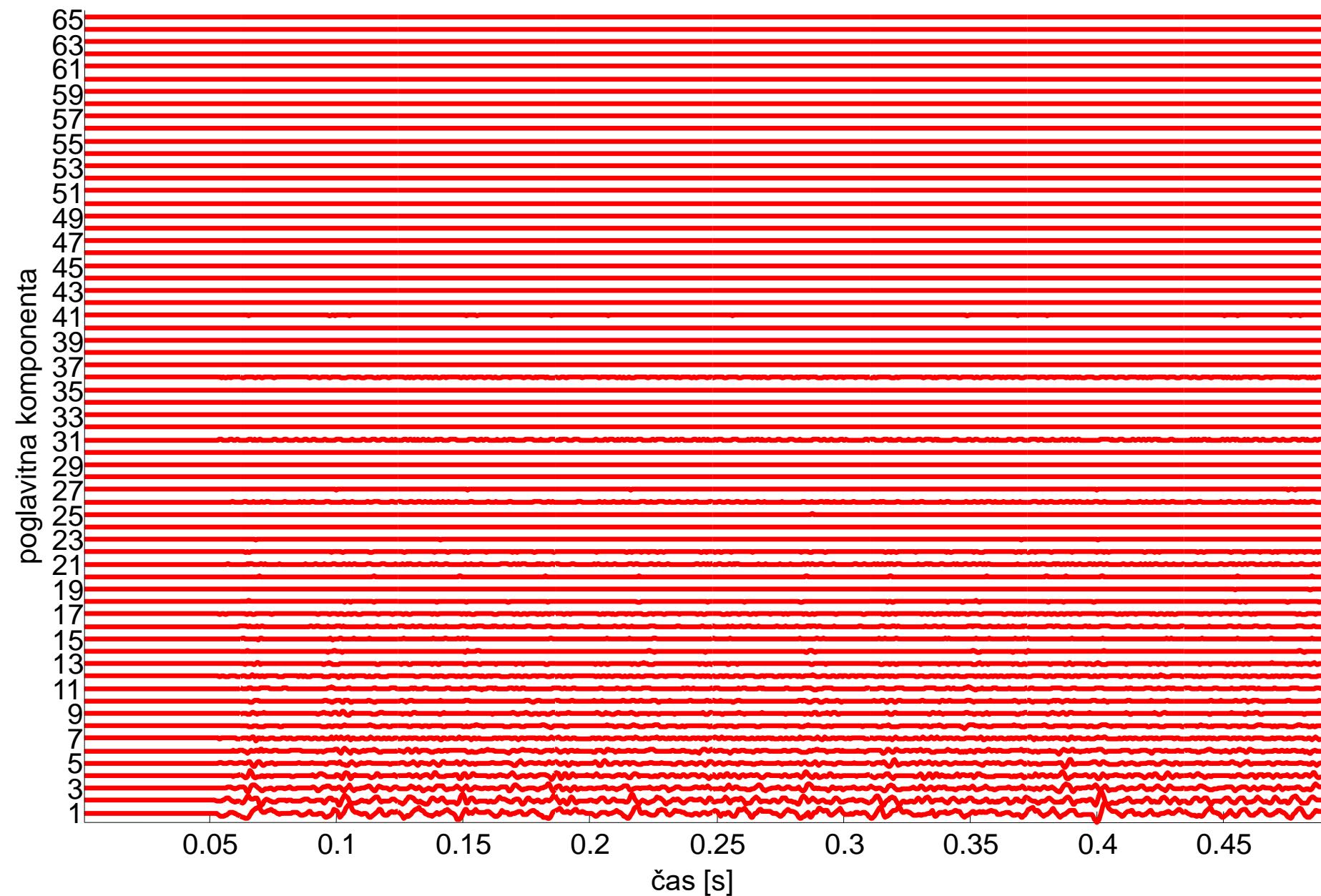
Redukcija dimenzij – najboljši primer za PCA



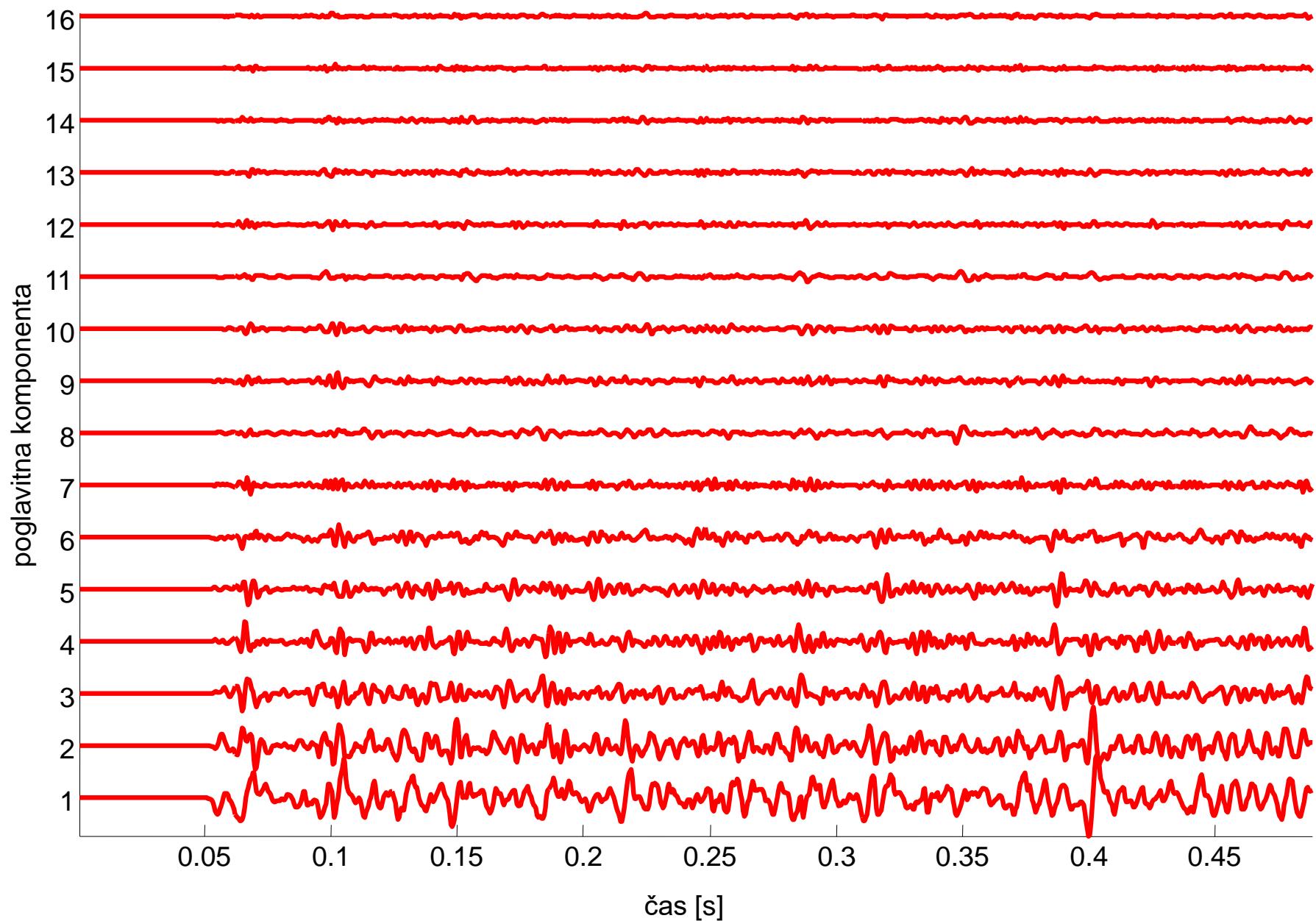
kumulativna energija:

$$E(K) = \frac{\sum_{k=1}^K \lambda_k}{\sum_{m=1}^M \lambda_m}$$

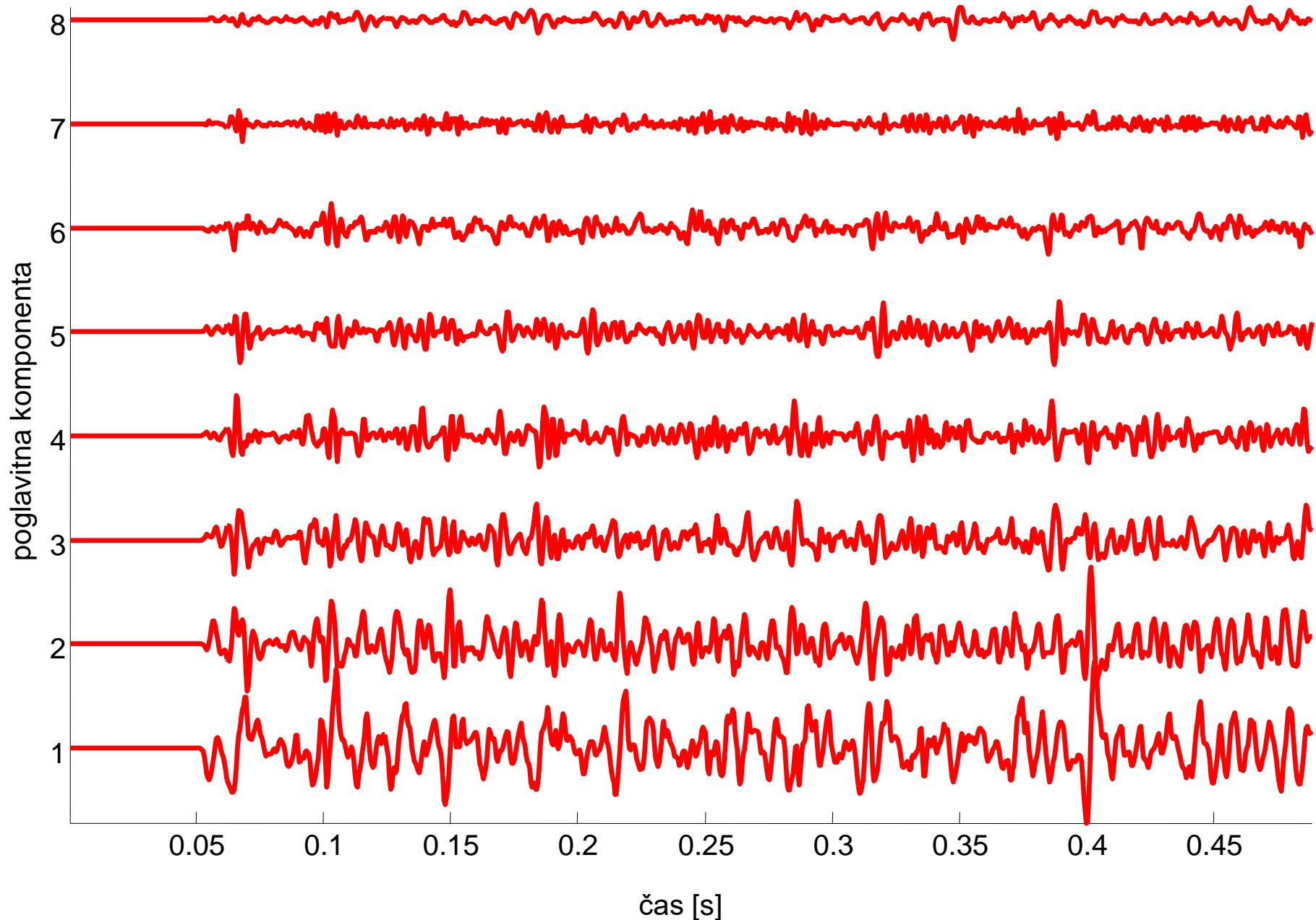
Primer 4: poglavitne komponente $y[n]$



Primer 4: poglavitne komponente $y[n]$



Primer 4: poglavitne komponente $y[n]$



Rekonstrukcija meritev

Po definiciji: $\mathbf{x}[n] = \mathbf{E}\mathbf{y}[n] = \sum_{m=1}^M \mathbf{e}_m y_m[n]$

kjer je \mathbf{e}_m m -ti lastni vektor matrike $\mathbf{C}_{\mathbf{x}}$

Ker je

$$E\{y_m^2[n]\} = E\{\mathbf{e}_m^T \mathbf{x}[n] \mathbf{x}^T[n] \mathbf{e}_m\} = \mathbf{e}_m^T \mathbf{C}_{\mathbf{x}} \mathbf{e}_m = \lambda_m$$

lahko $\mathbf{x}[n]$ aproksimiramo z

$$\hat{\mathbf{x}}[n] = \sum_{k=1}^K \mathbf{e}_k y_k[n]$$

kjer je $K < M$

Redukcija dimenzij: ocena napake

- ocenimo kvadratični pogrešek takšne aproksimacije:

$$E \left\{ \| \mathbf{x}[n] - \hat{\mathbf{x}}[n] \|^2 \right\}$$

kjer $\mathbf{x}[n] = \sum_{k=1}^M \mathbf{e}_k y_k[n]$ in $\hat{\mathbf{x}}[n] = \sum_{k=1}^K \mathbf{e}_k y_k[n]$.

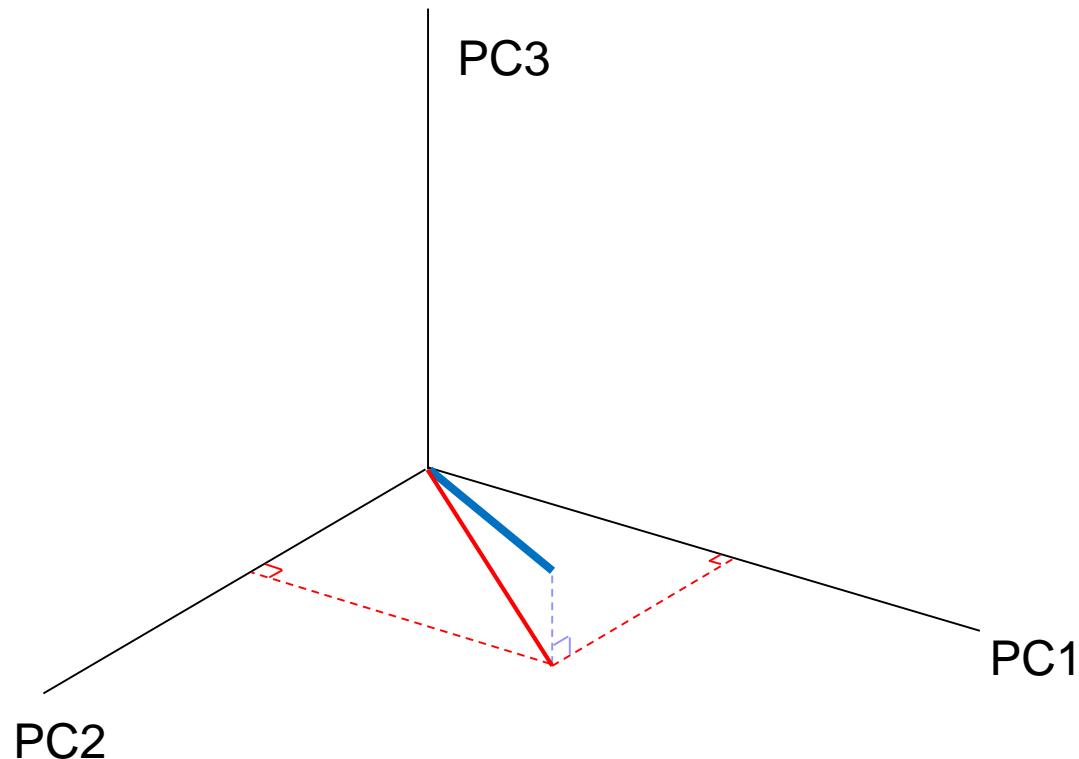
- krajša matematična manipulacija:

$$\begin{aligned} E \left\{ \| \mathbf{x}[n] - \hat{\mathbf{x}}[n] \|^2 \right\} &= E \left\{ \left\| \sum_{m=K+1}^M \mathbf{e}_m y_m[n] \right\|^2 \right\} = E \left\{ \sum_{m=K+1}^M y_m[n] \mathbf{e}_m^T \mathbf{e}_m y_m[n] \right\} \\ &= \sum_{m=K+1}^M E \left\{ y_m^2[n] \right\} = \sum_{m=K+1}^M \lambda_m \end{aligned}$$

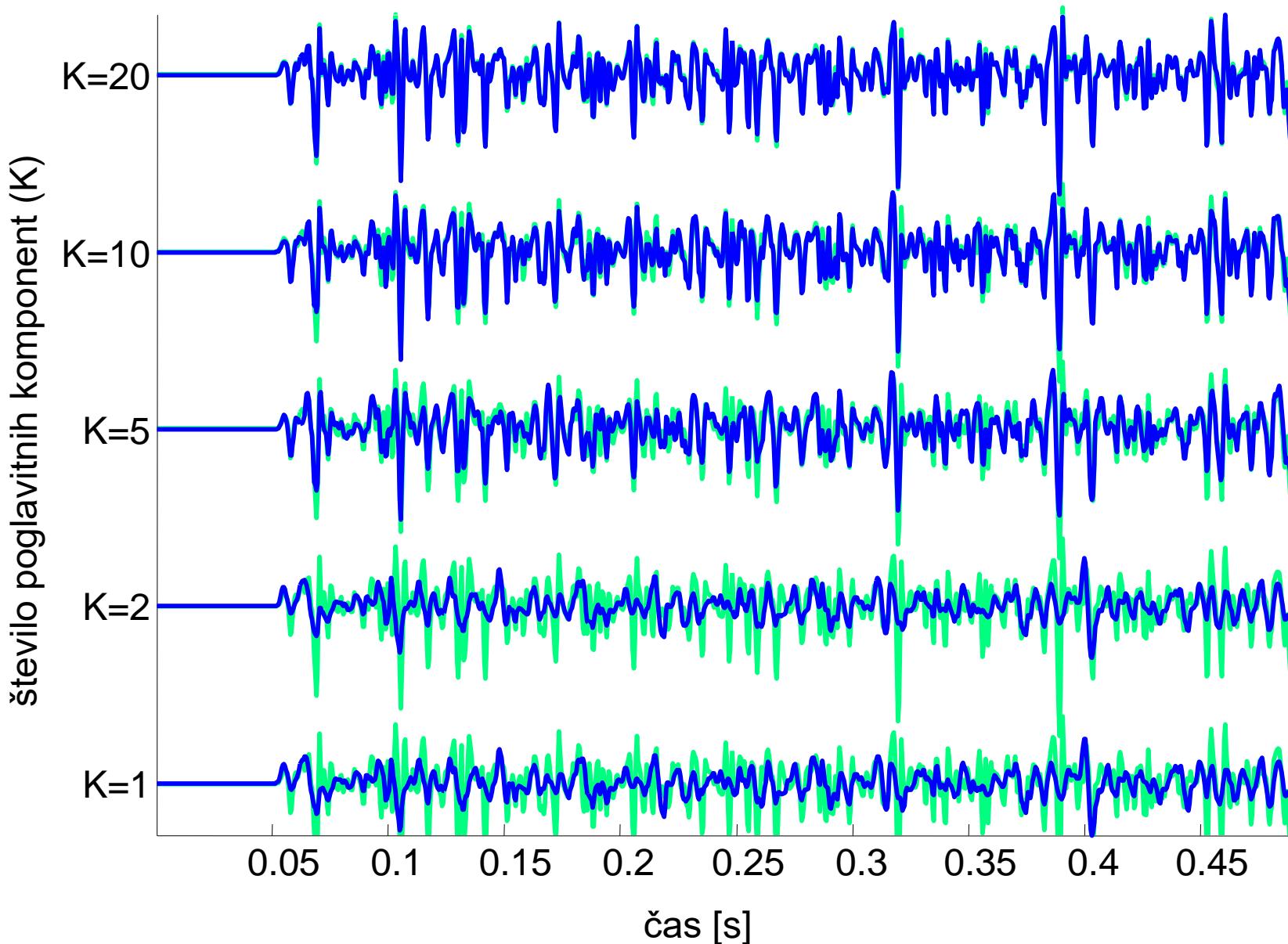
Redukcija dimenzij: ocena napake – grafični zgled

- stara dobra tabla...

... in zapiski



Primer 4: Napaka rekonstrukcije $\hat{\mathbf{x}}[n] = \sum_{k=1}^K \mathbf{e}_k y_k[n]$



Kako uporabiti PCA na sliki?





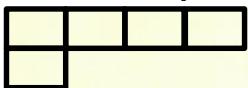
→

→

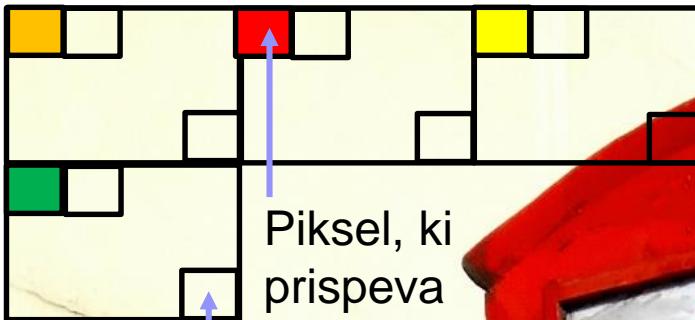
→



4x4 = 16 pikslov -> 16 meritev, s toliko vzorci, kot je blokov na sliki



$4 \times 4 = 16$ pikslov -> 16 meritv, s toliko vzorci, kot je blokov na sliki



Piksel, ki
prispeva
k prvi
meritvi

Piksel, ki
prispeva k 16.
meritvi

1. Meritev $x_1[n]$

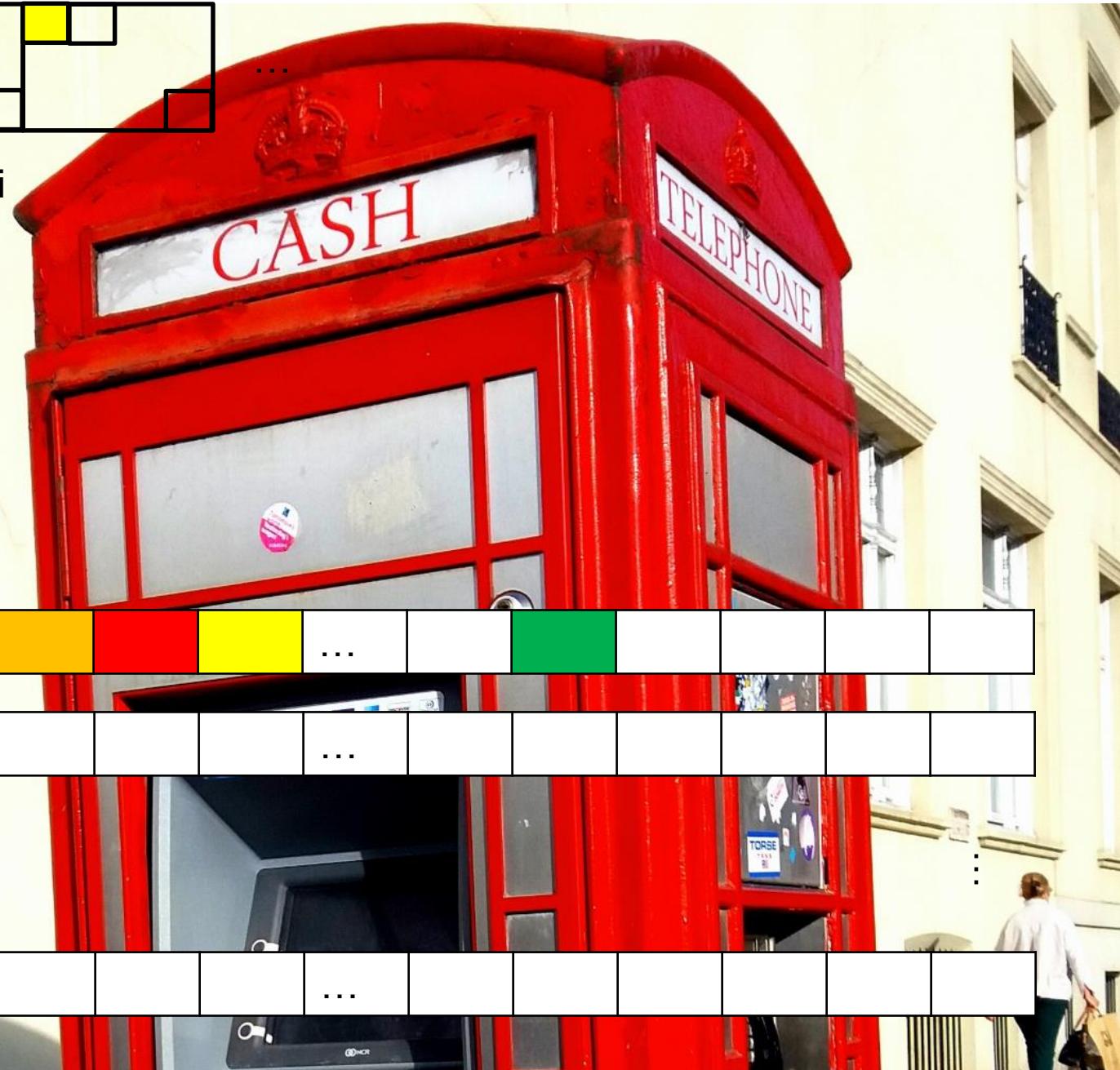


2. Meritev $x_2[n]$

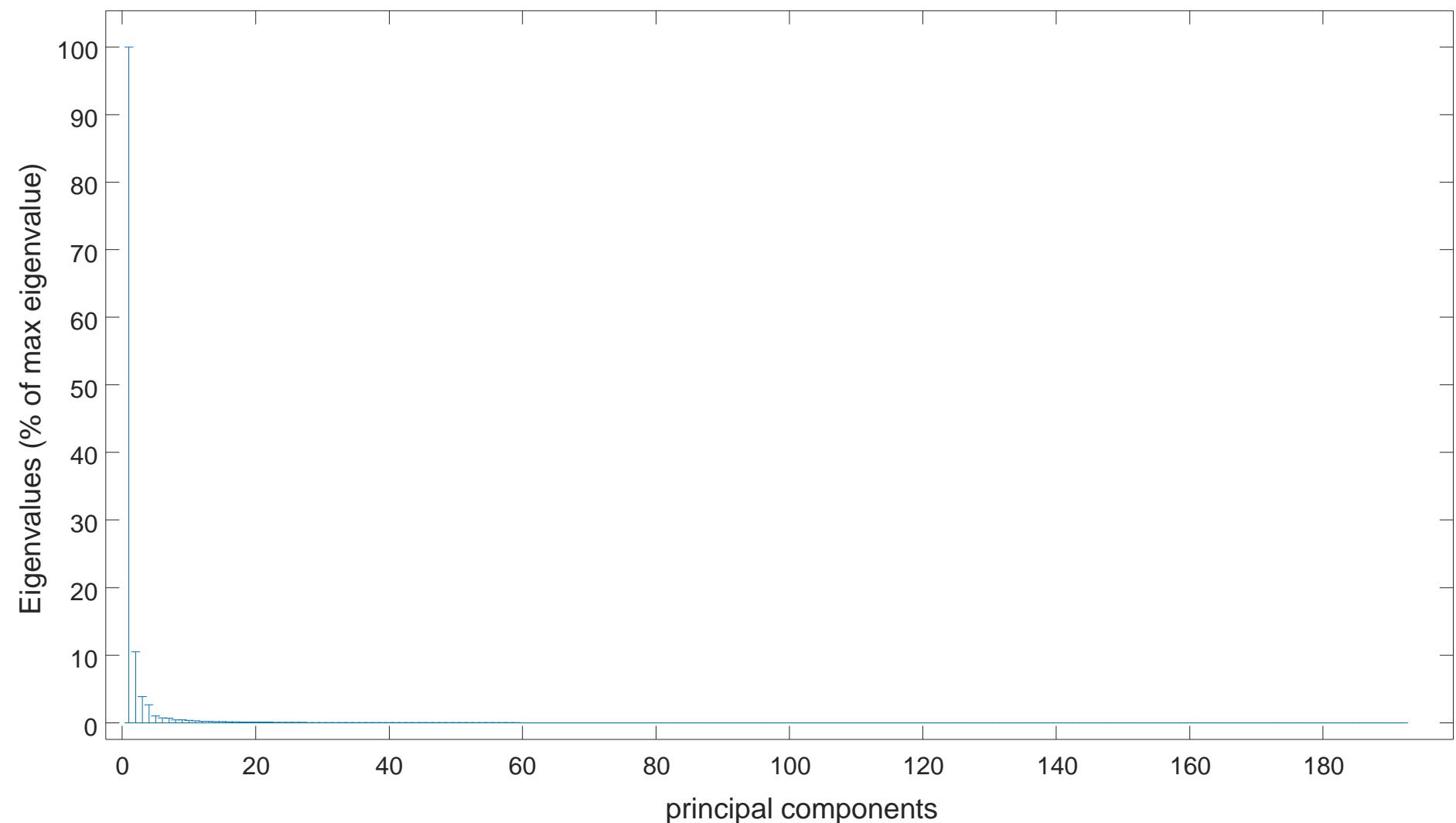


⋮ ⋮

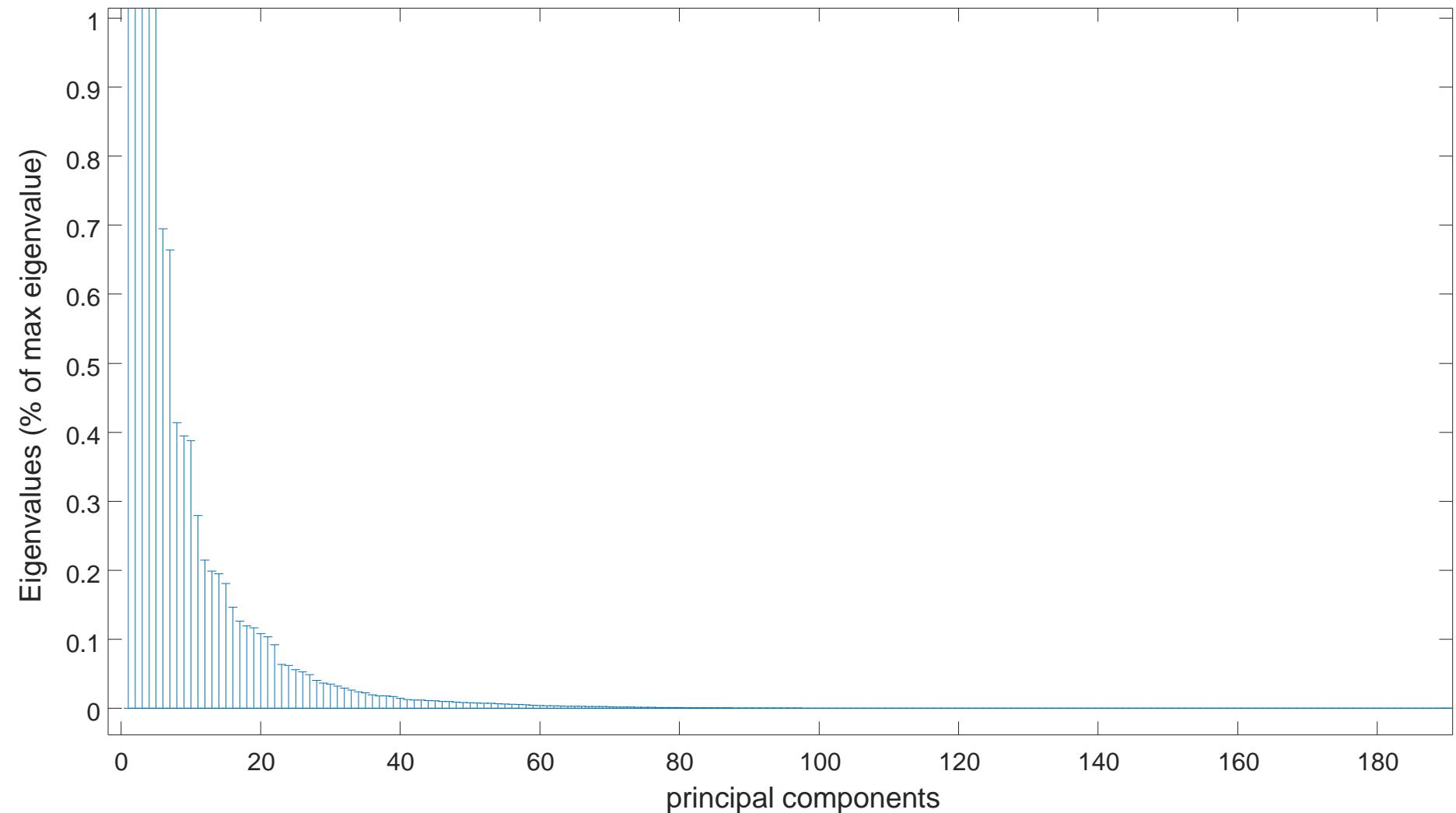
16. Meritev $x_{16}[n]$



Velikost bloka 8×8 ($64^*3 = 192$ PCA komponent)



Velikost bloka 8×8 ($64^3 = 192$ PCA komponent)



Velikost bloka 8×8 ($64 \times 3 = 192$ PCA komponent)

original image



Image reconstructed by 122 PCs



Image reconstructed by 62 PCs



Image reconstructed by 22 PCs



Velikost bloka 8×8 ($64 \times 3 = 192$ PCA komponent)

Image reconstructed by 8 PCs



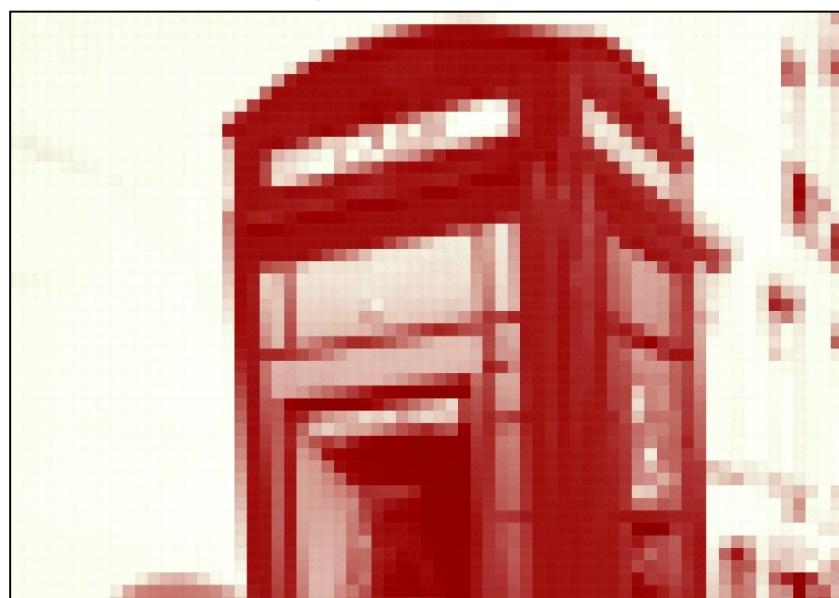
Image reconstructed by 5 PCs



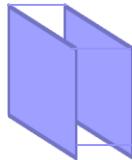
Image reconstructed by 3 PCs



Image reconstructed by 1 PCs



širina_slikovnega_okvirja x višina _slikovnega_okvirja x časovni_okvirji

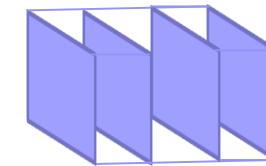


4x4x2

dinamična
scena



čas (v slikovnih okvirjih)



4x4x4

bolj statična
scena

1. PRIMER: 3D koordinate ptic v gibanju jate z 200 pticami, ko ta jata lovi jato mušic:

Meritev 1: x koordinata ptice 1 v času

Meritev 2: y koordinata ptice 1 v času

Meritev 3: z koordinata ptice 1 v času

Meritev 4: x koordinata ptice 2 v času

...

Meritev 600:

ali 3 x PCA ločeno po x, y in z koordinatah

Meritev 1: x koordinata ptice 1 v času

Meritev 2: x koordinata ptice 2 v času

Meritev 3: x koordinata ptice 3 v času

...

Meritev 200: x koordinata ptice 3 v času

potem pa nov PCA po:

Meritev 1: y koordinata ptice 1 v času

Meritev 2: y koordinata ptice 2 v času

Meritev 3: y koordinata ptice 3 v času

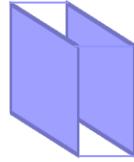
...

Meritev 200: y koordinata ptice 3 v času

2. PRIMER: Jutranja (ob 6. uri) temperatura krajev z > 5000 prebivalci v Sloveniji skozi celo leto.

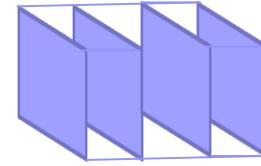
geografska in časovna lokalnost:

Geografska širina x geografska višina x čas (dnevi)



$4 \times 4 \times 2$

dinamična scena



$4 \times 4 \times 4$

bolj statična scena

matlab/octave: statistics toolbox

■ pca() method

eigenvalues of C_x
the eigenvalues of the covariance matrix of X

matrix of measurements
(each column corresponds to different measurement)

```
[E, Y, Lambda, tsquare] = pca (X);
```

principal components e_i
(the 1st pc is in the 1st column, the 2nd pc in the 2nd column, etc.)

matrix of projections y_i
(projection to the 1st pc is in the 1st column, projection to the 2nd column in the 2nd column, etc.)

Hotelling's T2 statistic
a measure of the multivariate distance of each observation from the center of the data set

matlab/octave: statistics toolbox

```
>> for k = 1:size(X,2) % meritve morajo imeti ničelno  
    % povprečje  
    X(:,k) = X(:,k) - mean(X(:,k));  
end
```



```
>> [E,Y,Lambda,tsquare] = pca(X); % PCA of X
```



```
>> X = Y * E'; % rekonstrukcija originalnih meritv
```



```
>> k = 1:K; rX = Y(:,k) * E(:,k)'; % rekonstrukcija  
    % iz zmanjšanega  
    % števila poglavitnih  
    % komponent
```

$$\hat{\mathbf{x}}[n] = \sum_{k=1}^K \mathbf{e}_k y_k[n]$$

Povzetek lastnosti analize PCA

- Linearnost.
 - zamenjava baze prostora je linearна operacija
- Potrebujemo samo ocene povprečja in variance:
 - $\mathbf{x}[n]$ morajo imeti ničelno povprečje,
 - porazdelitev meritev $\mathbf{x}[n]$ ni pomembna,
 - mešalni model (tvorba meritev) $\mathbf{x}[n]$ ni pomemben,
- **Informacija = energija (varianca): velike variance v $\mathbf{x}[n]$ so nosilke glavne dinamike**
- Smeri poglavitnih komponent so ortogonalne.
- Tudi poglavitne komponente so ortogonalne

Študijski material

- Jon Shlens: A TUTORIAL ON PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS: Derivation, Discussion and Singular Value Decomposition
http://www.cs.princeton.edu/picasso/mats/PCA-Tutorial-Intuition_jp.pdf
(nazorno učno gradivo z veliko zgledi)
- Smith, L.I. (2002), “A tutorial on Principal Components Analysis,
http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf
(zelo priljubljeno učno gradivo z neformalnimi razlagami)
- A. Daffertshofer et al., PCA in studying coordination and variability: a tutorial, in *Clinical Biomechanics*, vol. 19, pp. 415–428, 2004
(Nazoren članek z lepimi prikazi rezultatov analize PCA)

PRIMERI UPORABE ANALIZE PCA

A. Daffertshofer, C. J. C. Lamothe, O. G. Meijer, P. J. Beek: **PCA in studying coordination and variability: a tutorial**, Clin Biomech (Bristol, Avon), 2004 May;19(4):415-28. DOI: [10.1016/j.clinbiomech.2004.01.005](https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2004.01.005)

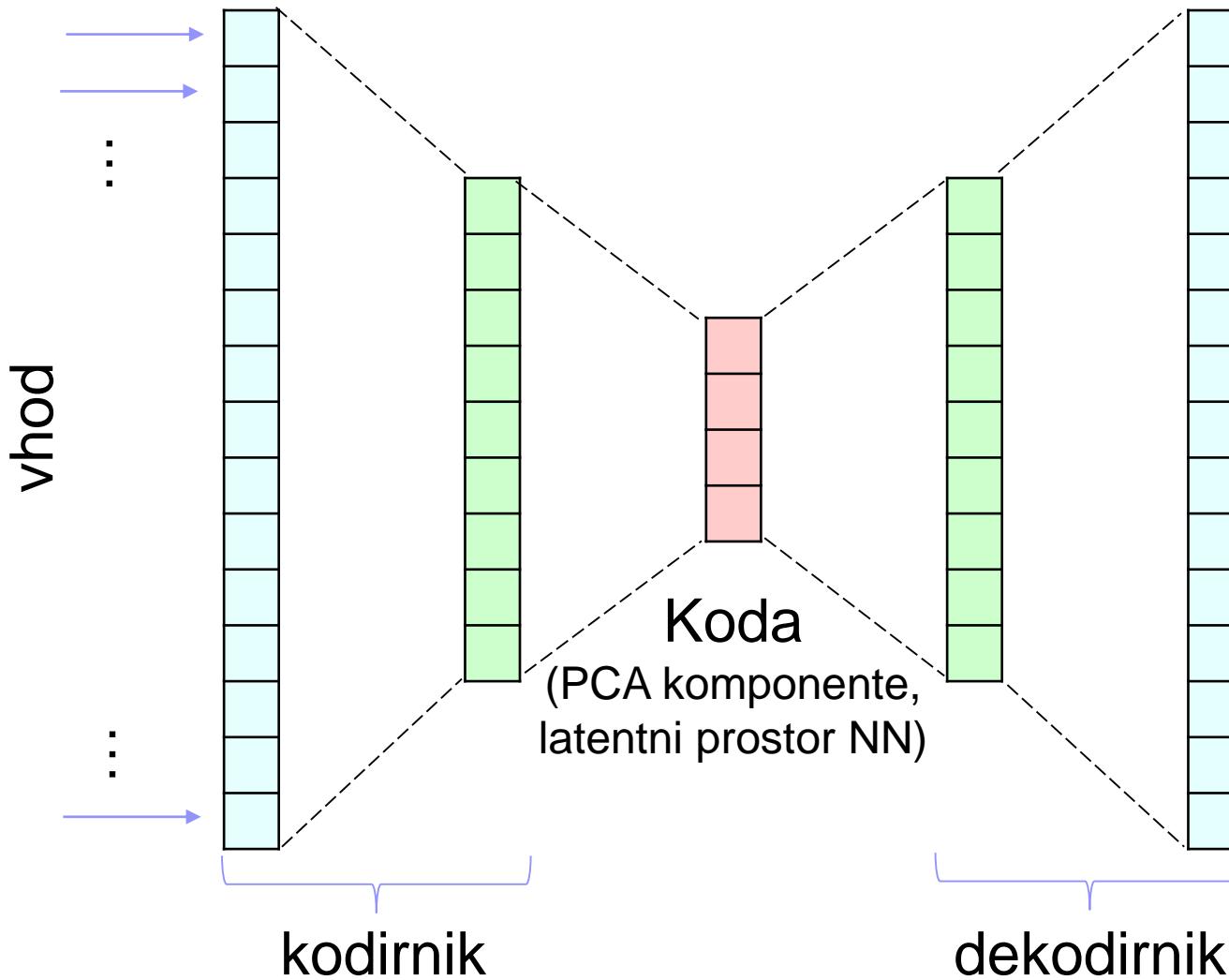
B. J. Stetter, M. Herzog, F. Möhler, S. Sell, T. Stein: **Modularity in Motor Control: Similarities in Kinematic Synergies Across Varying Locomotion Tasks**, Front Sports Act Living 2020 Nov 13, DOI: [10.3389/fspor.2020.596063](https://doi.org/10.3389/fspor.2020.596063)

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7739575/>

R. Z. U. Rehman, Y. Zhou, S. Del Din, L. Alcock, C. Hansen, Y. Guan, T. Hortobágyi, W. Maetzler, L. Rochester, C. J. C. Lamothe: **Gait Analysis with Wearables Can Accurately Classify Fallers from Non-Fallers: A Step toward Better Management of Neurological Disorders**, Sensors (Basel) 2020 Dec 7;20(23):6992
DOI: [10.3390/s20236992](https://doi.org/10.3390/s20236992) , <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33297395/>

Kodirnik in dekodirnik

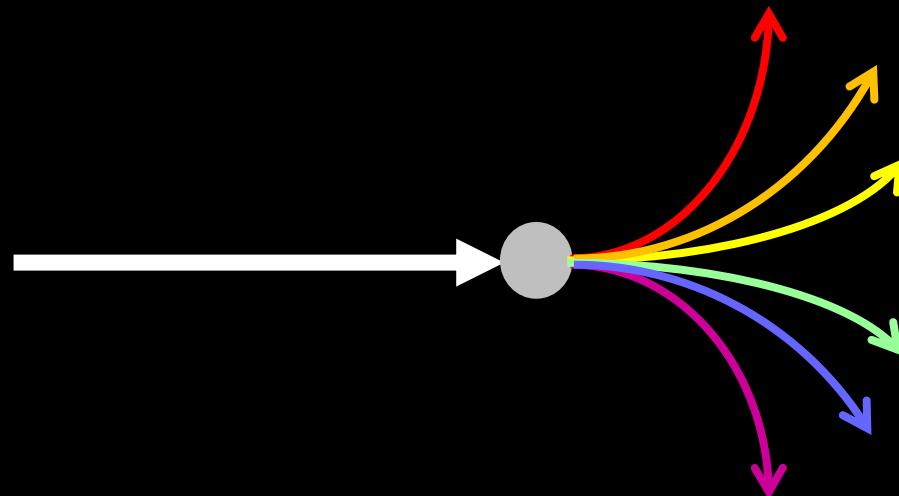
(angl. autoencoder)



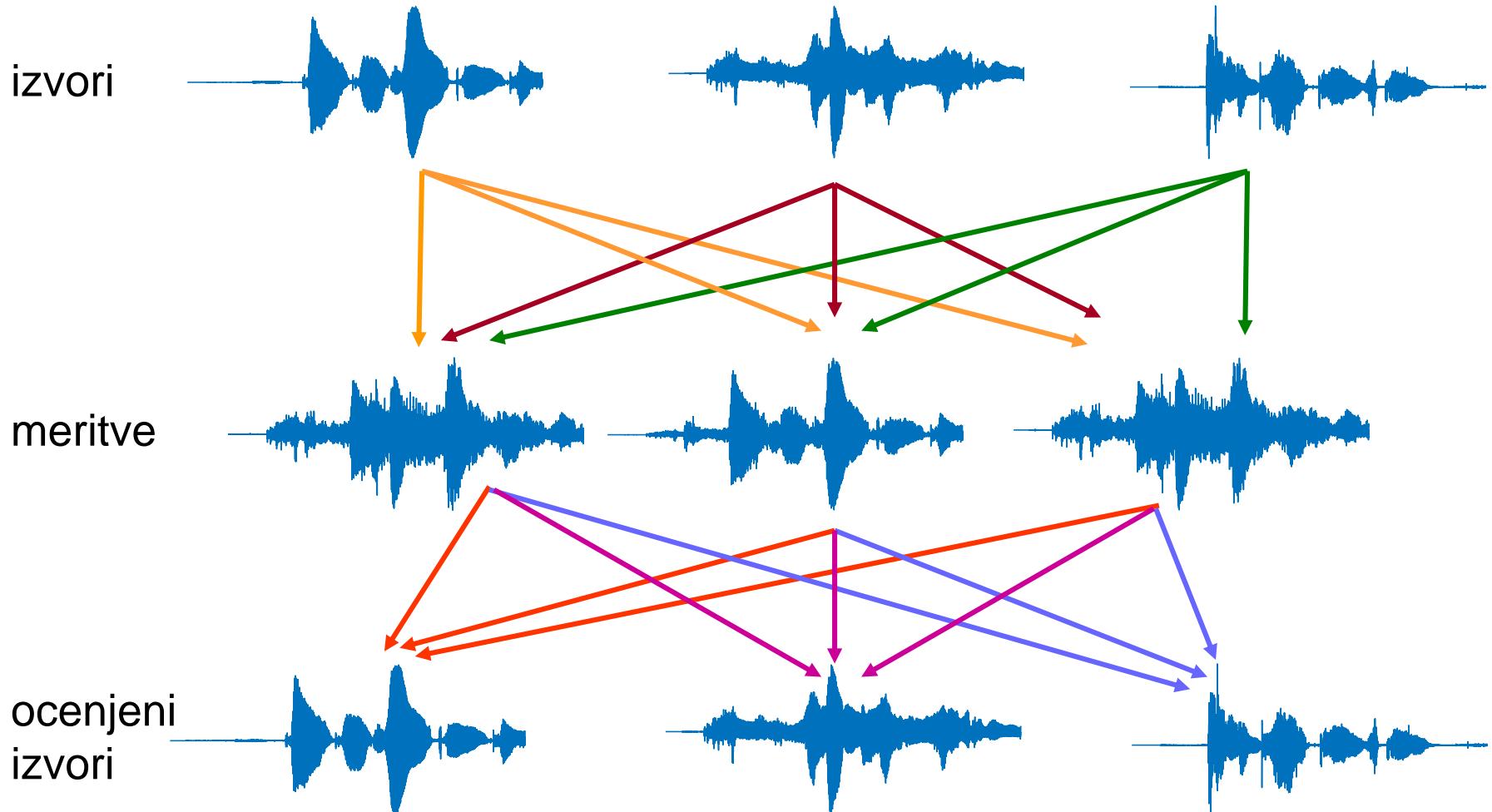
Brez dodatnih pravil o generiranih kodi bo avtoenkoder najverjetneje konvergiral k rešitvi, ki je podobna rezultatu PCA

LOČITEV IZVOROV IN ANALIZA NEODVISNIH KOMPONENT

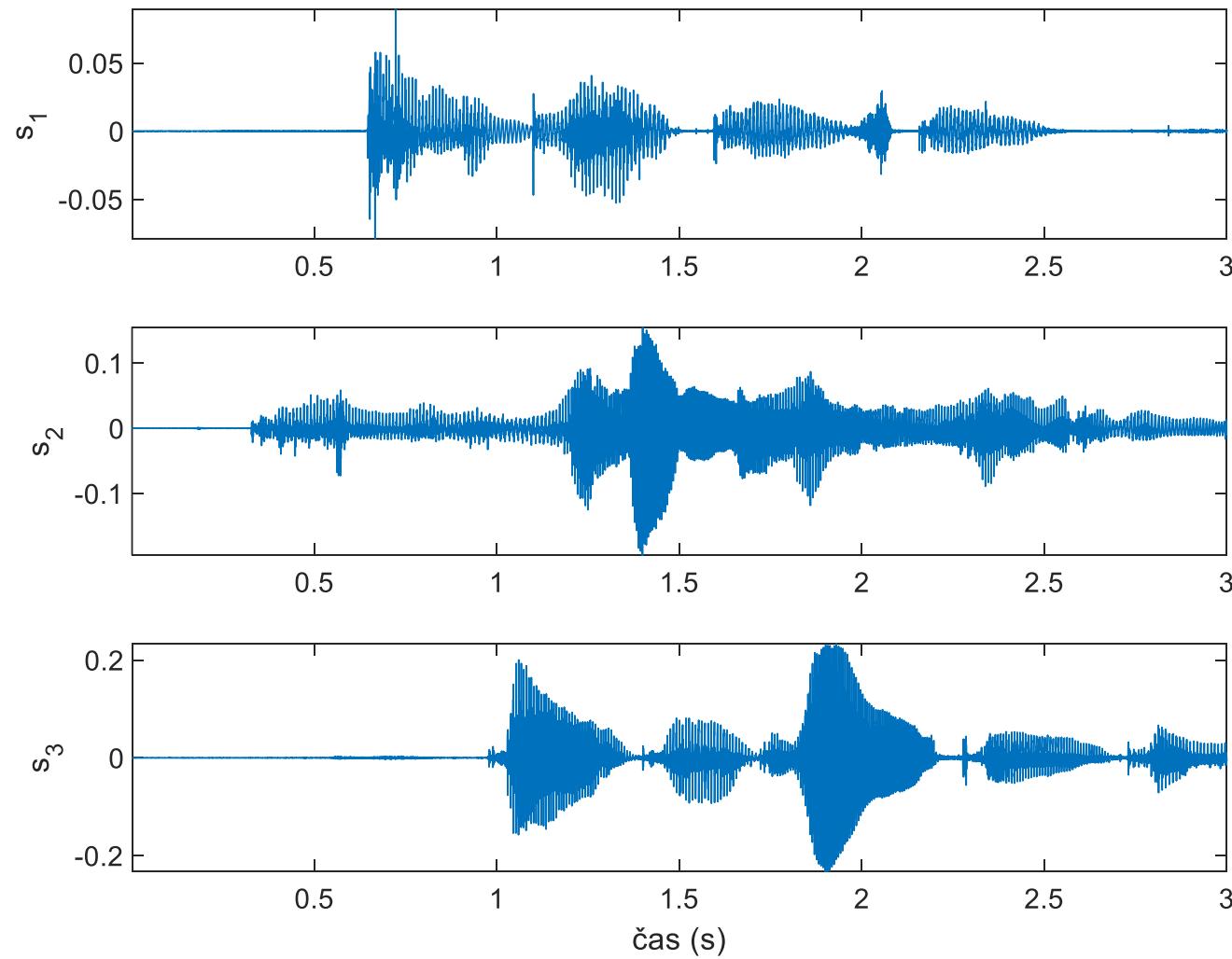
Source separation & Independent component analysis



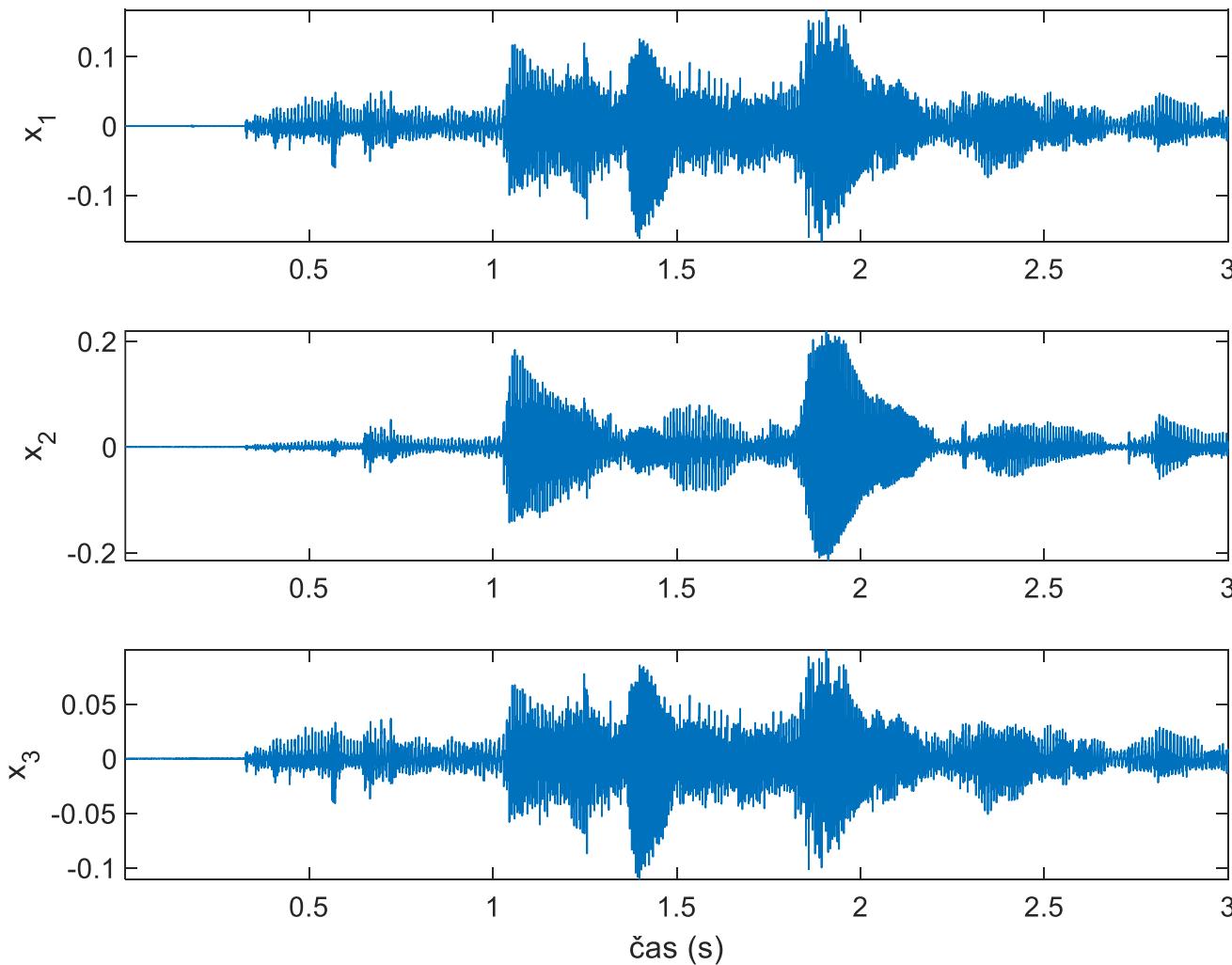
Ocenjevanje izvorov iz njihovih linearnih mešanic



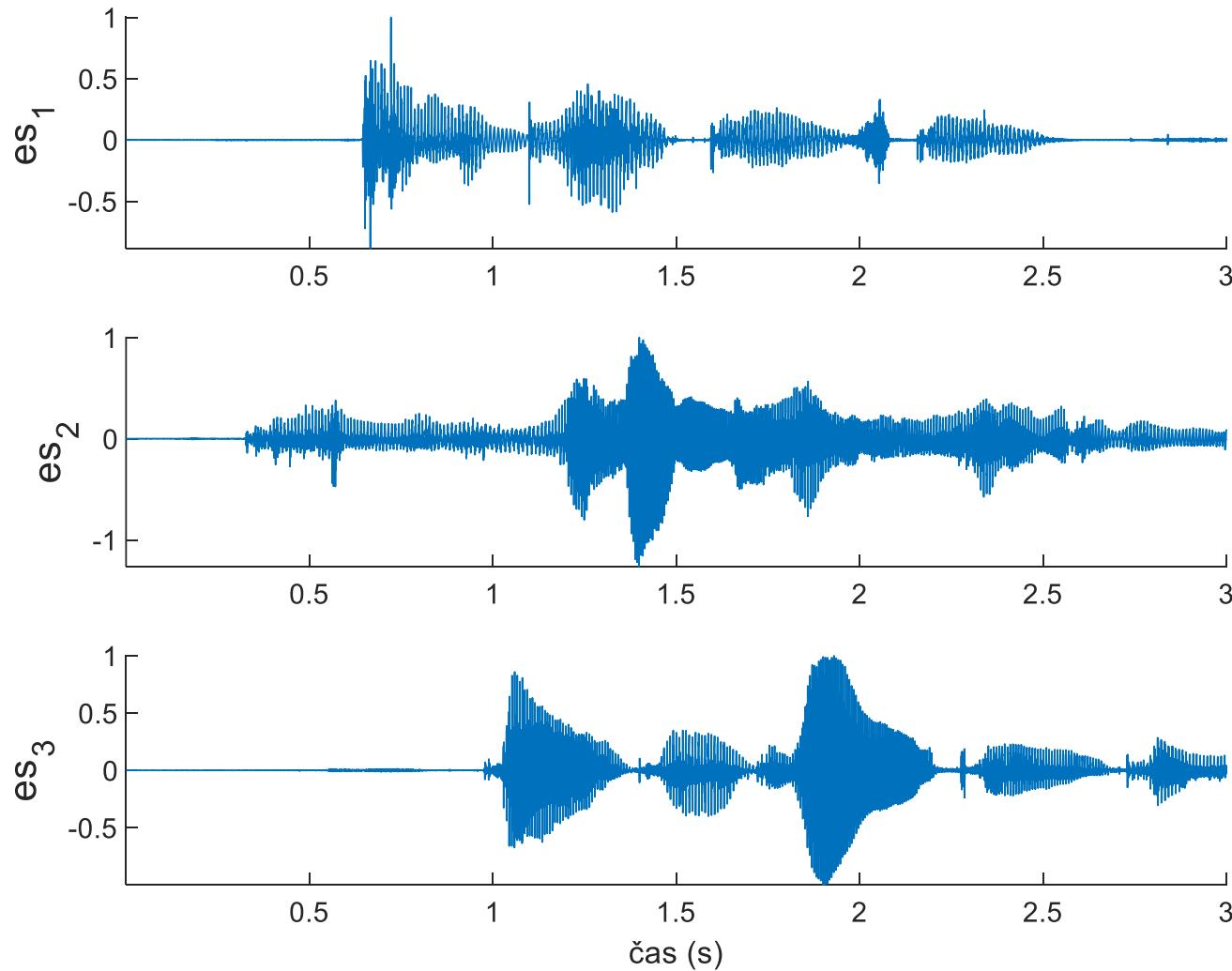
Izvori



Meritve/mešanice izvorov



Ocenjeni izvori



Matematična notacija

Danih naj bo M meritev (digitalnih signalov):

$$\mathbf{x}[n] = \begin{bmatrix} x_1[n] \\ x_2[n] \\ \vdots \\ x_M[n] \end{bmatrix} \quad n = 1, \dots, N$$

kjer je n vzorec signala.

Matematični model meritev:

$$\begin{aligned}x_1[n] &= a_{11}s_1[n] + a_{12}s_2[n] + a_{13}s_3[n] \\x_2[n] &= a_{21}s_1[n] + a_{22}s_2[n] + a_{23}s_3[n] \\x_3[n] &= a_{31}s_1[n] + a_{32}s_2[n] + a_{33}s_3[n]\end{aligned}\quad \rightarrow \quad \mathbf{x}[n] = \mathbf{As}[n]$$

takošnji mešalni model

meritve

$$\mathbf{x}[n] = \begin{bmatrix} x_1[n] \\ x_2[n] \\ x_3[n] \end{bmatrix}$$

izvori

$$\mathbf{s}[n] = \begin{bmatrix} s_1[n] \\ s_2[n] \\ s_3[n] \end{bmatrix}$$

mešalna matrika

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_3 \end{bmatrix}$$

Mešalna matrika \mathbf{A} je konstantna

mešalni vektorji

Ločitev izvorov

$$s_1[n] = w_{11}x_1[n] + w_{12}x_2[n] + w_{13}x_3[n]$$

$$s_2[n] = w_{21}x_1[n] + w_{22}x_2[n] + w_{23}x_3[n]$$

$$s_3[n] = w_{31}x_1[n] + w_{32}x_2[n] + w_{33}x_3[n]$$

$$\mathbf{x}[n] = \begin{bmatrix} x_1[n] \\ x_2[n] \\ x_3[n] \end{bmatrix}$$

meritve

$$\mathbf{s}[n] = \begin{bmatrix} s_1[n] \\ s_2[n] \\ s_3[n] \end{bmatrix}$$

izvori

$$\mathbf{W} = \left[\begin{array}{ccc|c} w_{11} & w_{12} & w_{13} & \mathbf{w}_1^T \\ \hline w_{21} & w_{22} & w_{23} & \mathbf{w}_2^T \\ \hline w_{31} & w_{32} & w_{33} & \mathbf{w}_3^T \end{array} \right]$$

separacijska matrika

$$\mathbf{s}[n] = \mathbf{W}\mathbf{x}[n]$$

$$s_i[n] = \mathbf{w}_i^T \mathbf{x}[n]$$

Separacijska matrika \mathbf{W} je konstantna.
Idealno $\mathbf{A}\mathbf{W} = \mathbf{I}$

\mathbf{w}_i – separacijski vektor

Omejitve in nedoločenosti:

- Izvori so statistično neodvisni

$$p(s_1[n], s_2[n], \dots, s_K[n]) = p(s_1[n]) p(s_2[n]) \dots p(s_K[n])$$

skupna verjetnost verjetnost posameznega izvora

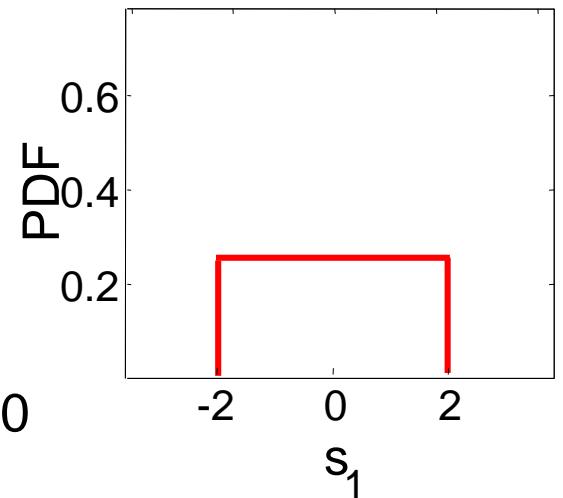
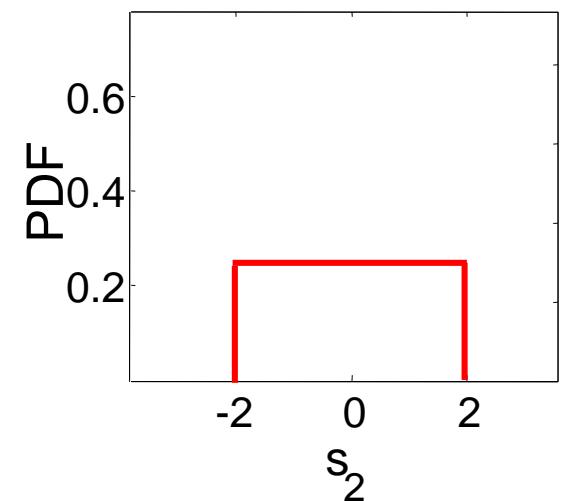
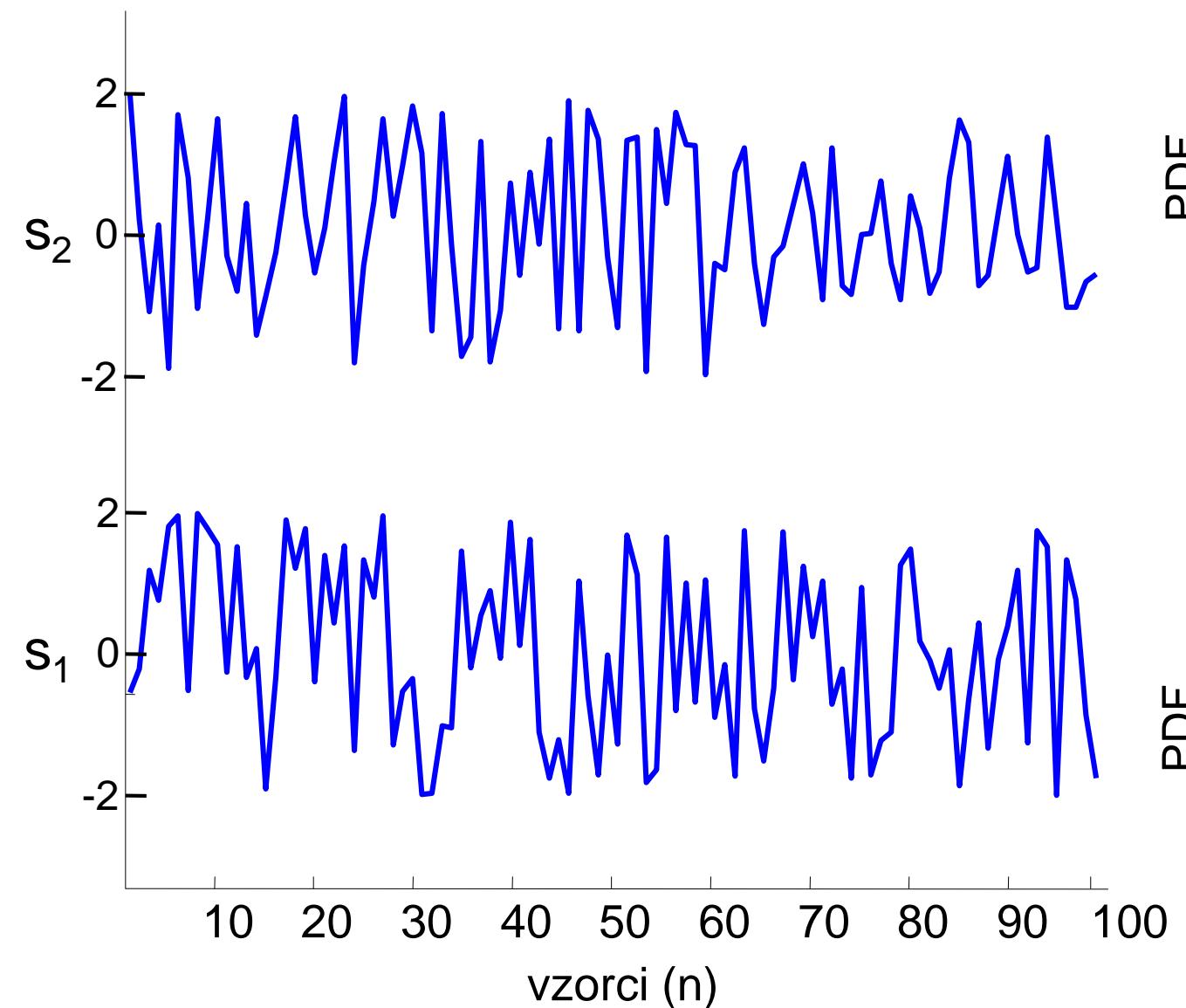
- Energije (variance) izvorov (matrike) ne moremo določiti

$$\forall \alpha_i \neq 0 \Rightarrow \mathbf{x}[n] = \sum_{i=1}^K \left(\frac{1}{\alpha_i} \mathbf{a}_i \right) (\alpha_i s_i[n])$$

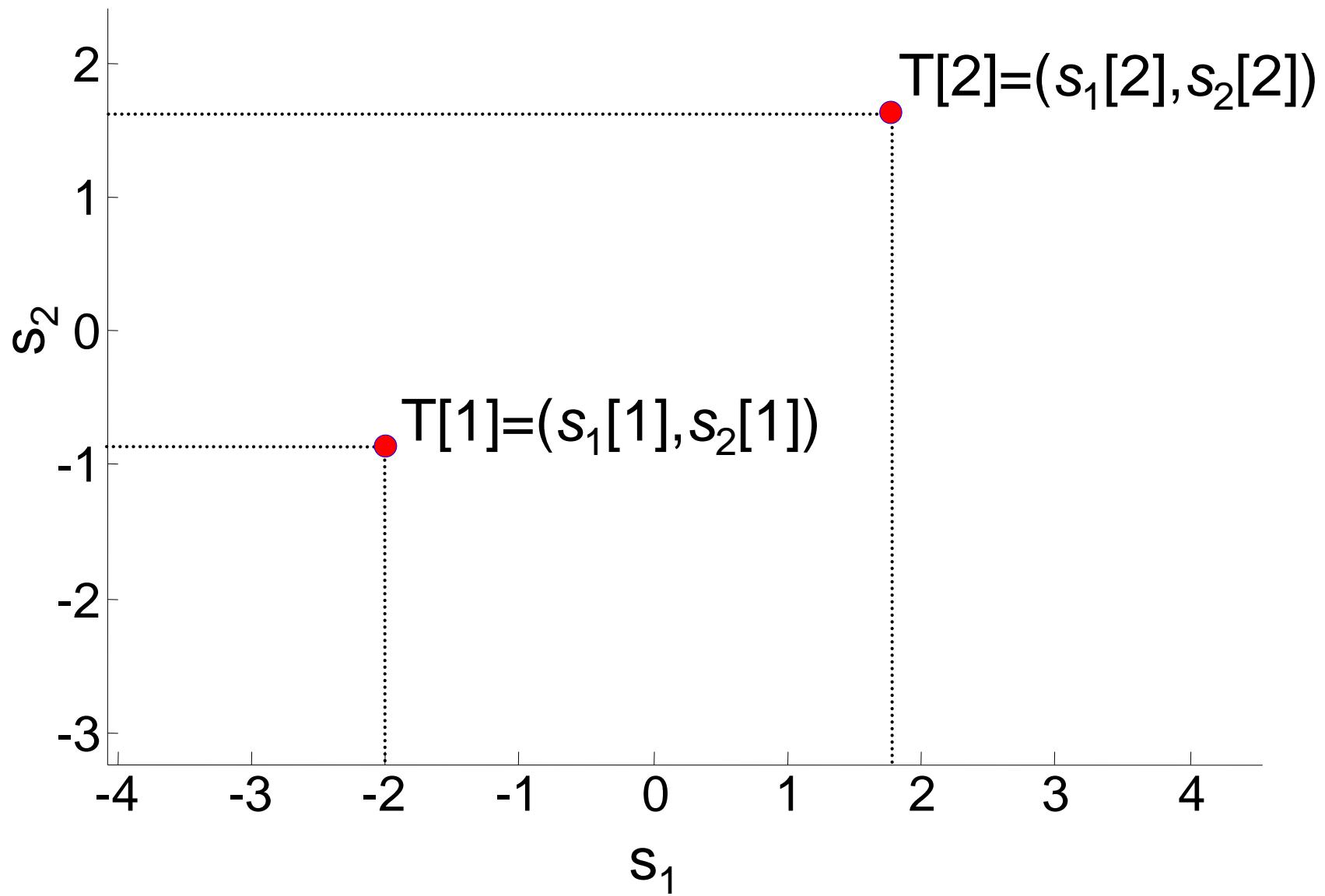
- Vrstni red izvorov je neznan in nedoločljiv

$$\mathbf{x}[n] = (\mathbf{A}\mathbf{P}^{-1})\mathbf{Ps}[n] \quad \mathbf{P} \text{ je permutacijska matrika}$$

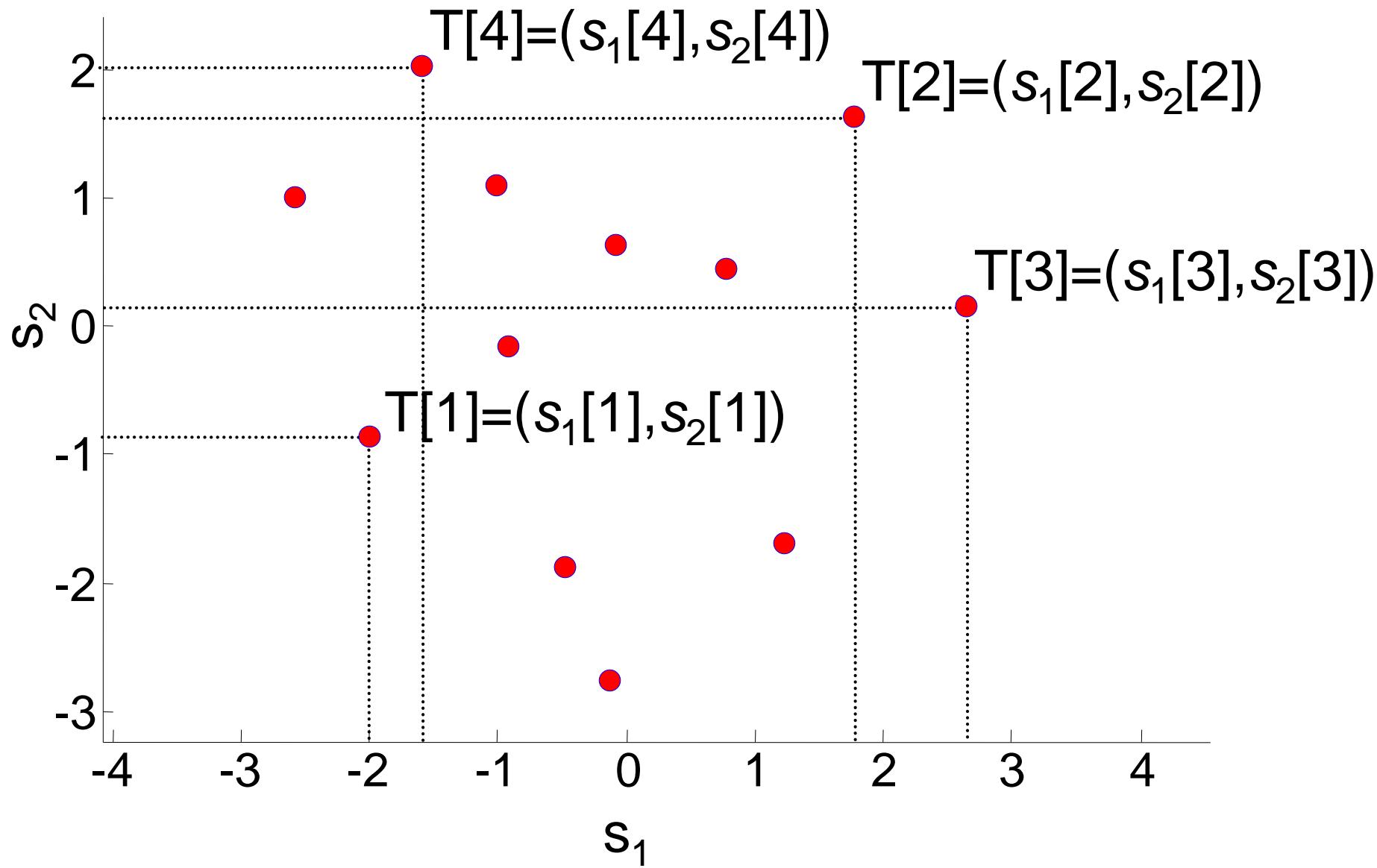
Primer 1: dve meritvi, enakomerna porazdelitev



Skupni vektorski prostor



Skupni vektorski prostor

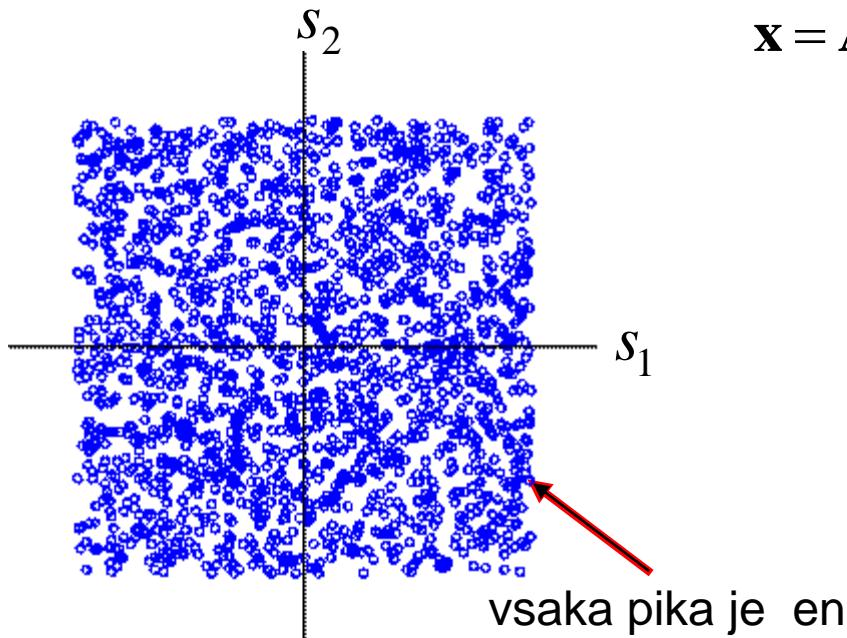


Enakomerna porazdelitev

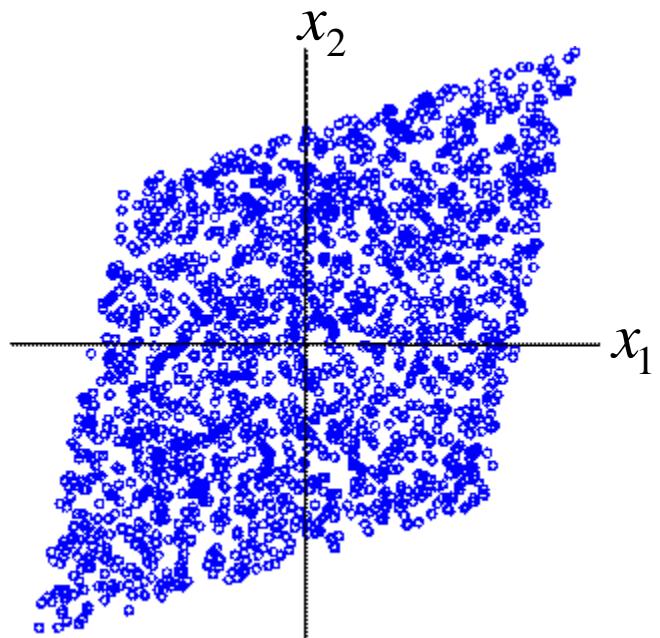


$$p(s_i) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{3}} & \text{če } |s_i| \leq \sqrt{3} \\ 0 & \text{drugače} \end{cases}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3 & 10 \\ 10 & 3 \end{bmatrix}$$



neodvisni izvori



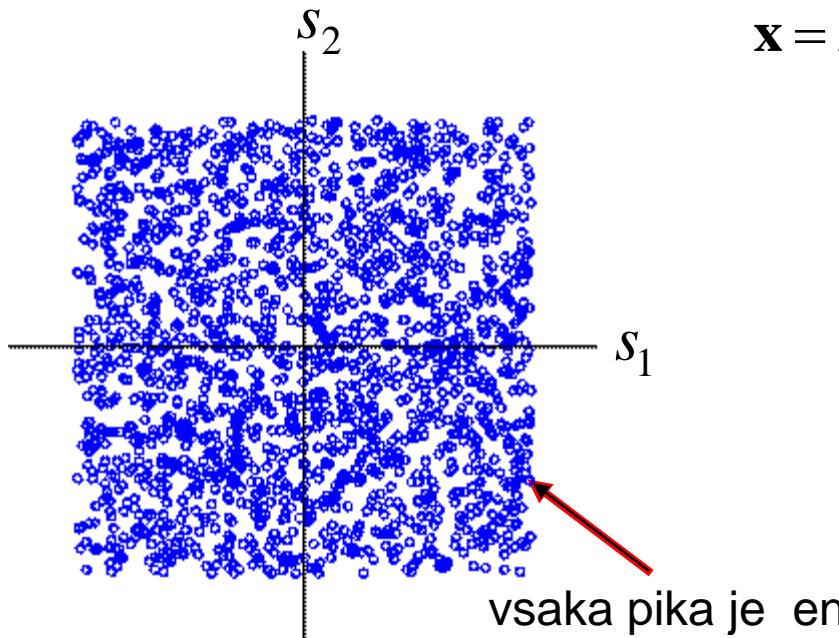
odvisne meritve

Enakomerna porazdelitev

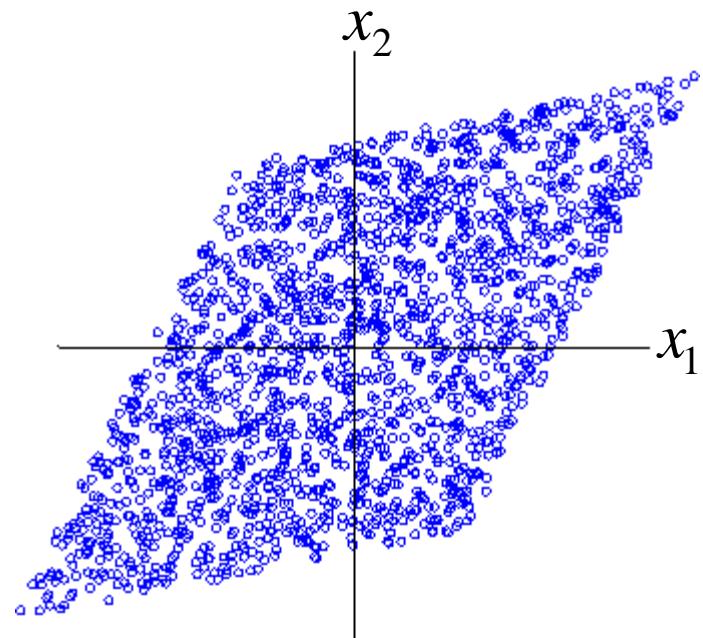


$$p(s_i) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{3}} & \text{če } |s_i| \leq \sqrt{3} \\ 0 & \text{drugače} \end{cases}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 5 & 10 \\ 10 & 2 \end{bmatrix}$$

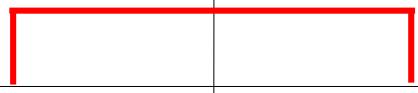


neodvisni izvori

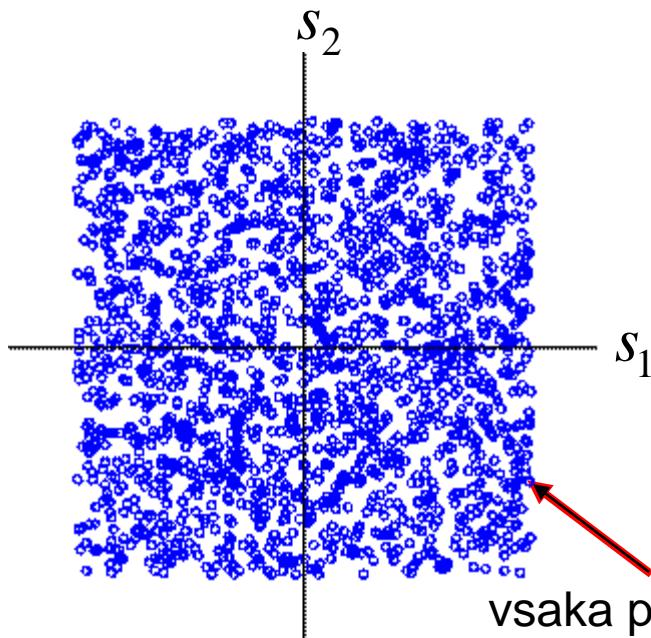


odvisne meritve

Enakomerna porazdelitev



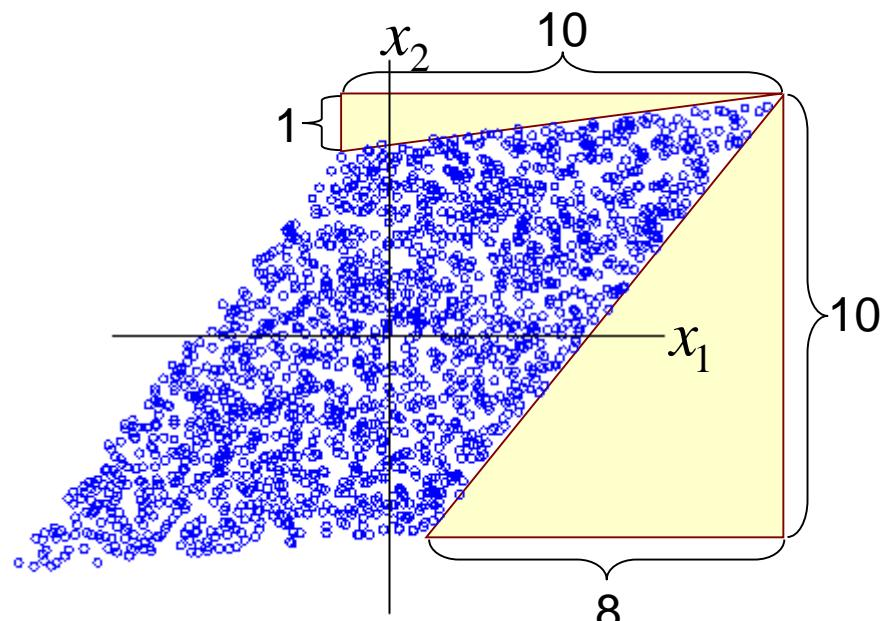
$$p(s_i) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{3}} & \text{če } |s_i| \leq \sqrt{3} \\ 0 & \text{drugače} \end{cases}$$



neodvisni izvori

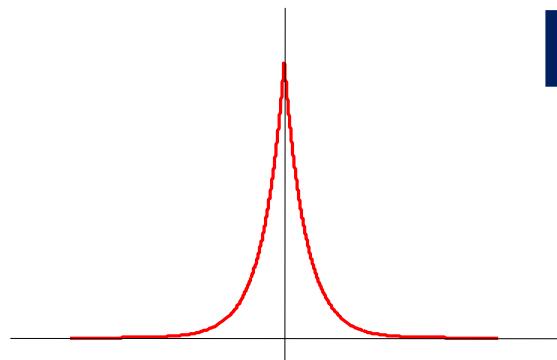
$$\mathbf{x} = \mathbf{As}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 8 & 10 \\ 10 & 1 \end{bmatrix}$$



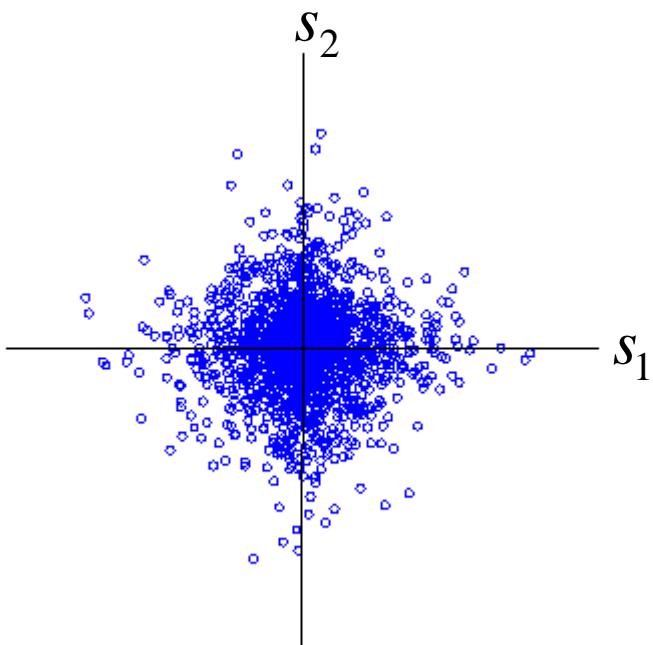
odvisne meritve

Laplacova porazdelitev



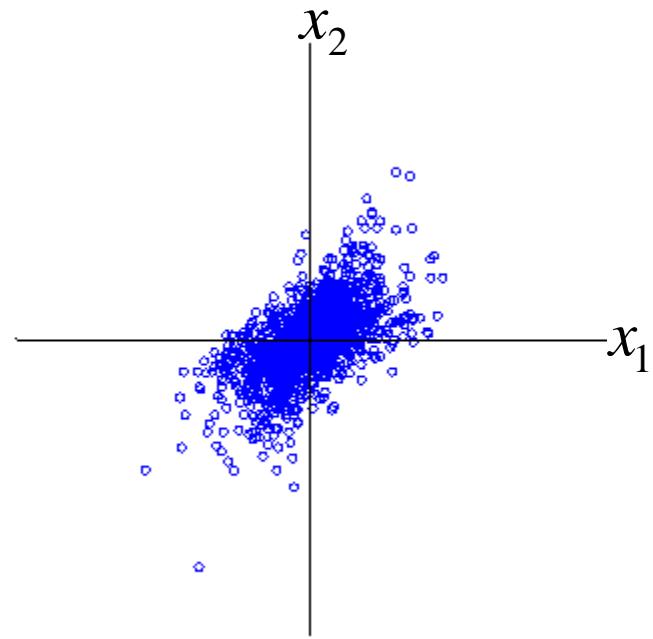
$$p(s_i) = \frac{1}{2} e^{-|x|}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 5 & 10 \\ 10 & 2 \end{bmatrix}$$



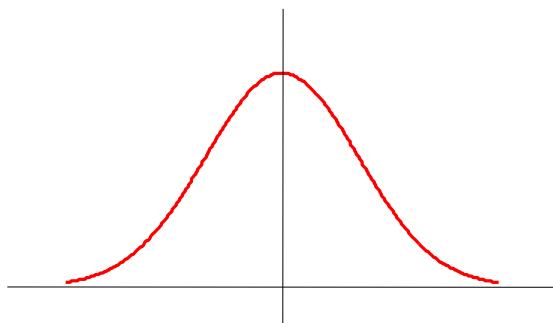
neodvisni izvori

$$\mathbf{x} = \mathbf{As}$$

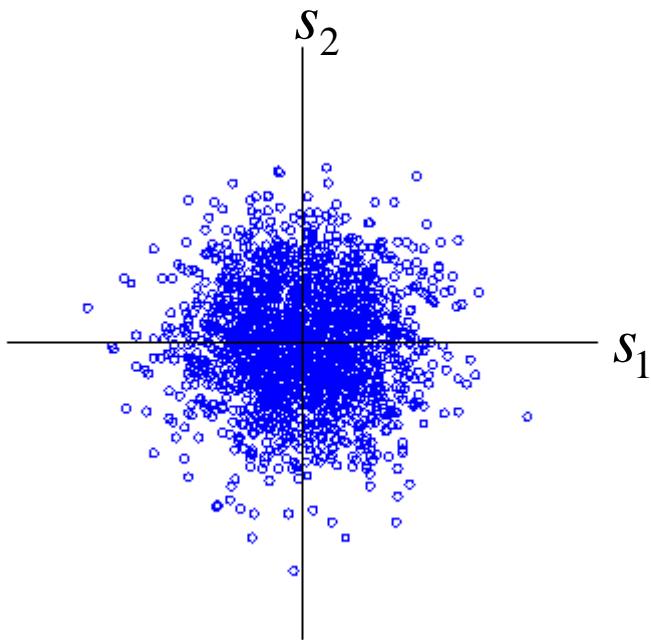


odvisne meritve

Gaussova porazelitev



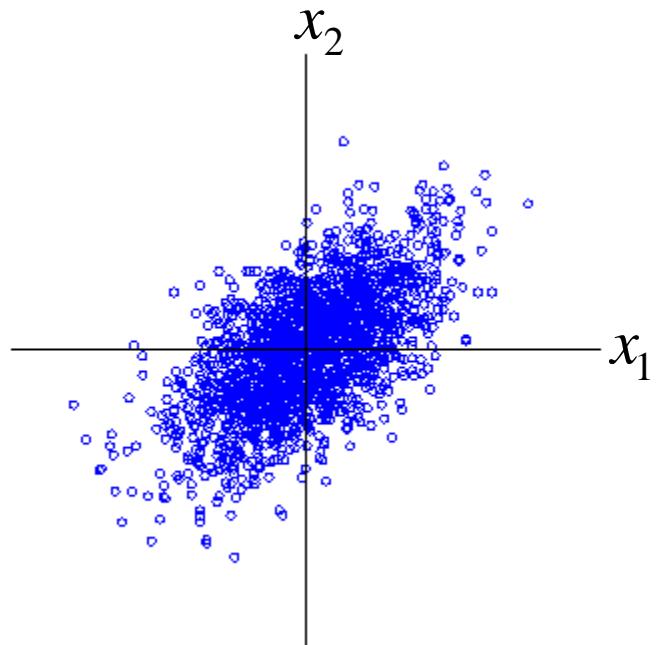
$$p(s_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$



neodvisni izvori

$$\mathbf{x} = \mathbf{As}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 5 & 10 \\ 10 & 2 \end{bmatrix}$$



odvisne meritve

Korelacijska matrika meritev $\mathbf{x}[n]$

$$\mathbf{C}_{\mathbf{x}} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}[n] \mathbf{x}^T[n] = \begin{bmatrix} c(x_1, x_1) & c(x_1, x_2) & \cdots & c(x_1, x_M) \\ c(x_2, x_1) & c(x_2, x_2) & \cdots & c(x_2, x_M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c(x_M, x_1) & c(x_M, x_2) & \cdots & c(x_M, x_M) \end{bmatrix}$$

$$\text{kjer je } c(x_i, x_j) = E(x_i \cdot x_j) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N x_i[n] x_j[n]$$

- $c(x_i, x_i)$ meri varianco $x_i \rightarrow$ maksimiziraj $c(x_i, x_i)$
- $c(x_i, x_j)$ meri korelacijo med x_i in $x_j \rightarrow$ minimiziraj $c(x_i, x_j)$

Analiza PCA

- Najdi takšno ortonormalno transformacijsko matriko \mathbf{P} da bo $\mathbf{y}[n] = \mathbf{Px}[n]$ in bo

$$\mathbf{C}_y = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \mathbf{y}^T[n] \mathbf{y}[n]$$

diagonalna matrika.

- Z drugimi besedami,
 - maksimiziraj $c(y_i, y_i)$
 - minimiziraj $c(y_i, y_j) \quad i \neq j$

Linearna transformacija P

- C_x je simetrična matrika. Diagonalizira jo ortonormalna matrika njenih lastnih vektorjev (E):

$$C_x = E D E^T$$

kjer je:

- D diagonalna matrika lastnih vrednosti λ_i matrike C_x . Brez izbube splošnosti lahko privzamemo, da so lastne vrednosti $\lambda_i = D[i,i]$ urejene v padajočem vrstnem redu.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3, \dots, \geq \lambda_M$$

- E je matrika ustreznih lastnih vektorjev matrike C_x (lastni vektorji so stolpci matrike E).

Linearna transformacija P

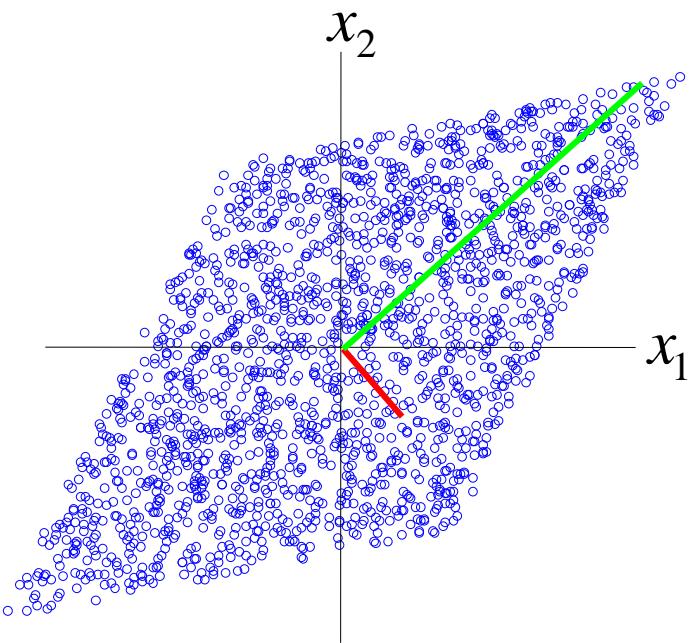
- Matematičen trik: izberi $P=E^T$

$$\begin{aligned} C_y &= PC_x P^T \\ &= E^T C_x E \\ &= E^T (E D E)^T E \\ &= (E^T E) D (E^T E) \\ &= D \end{aligned}$$

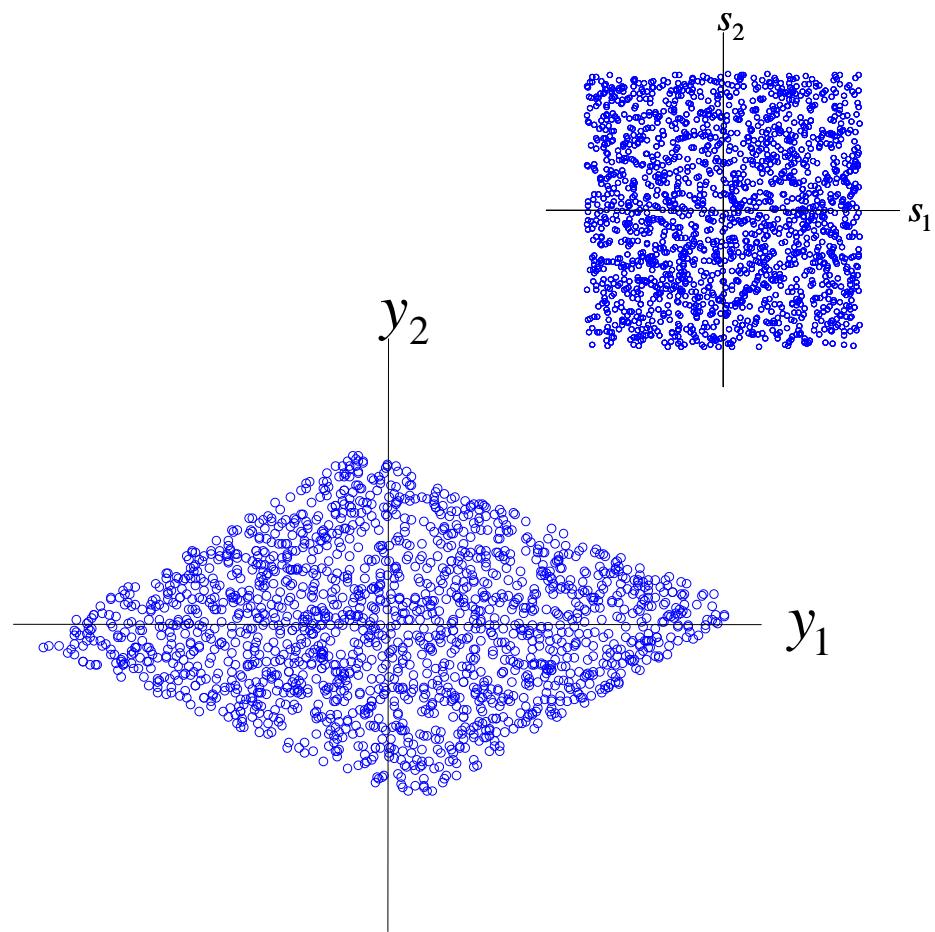
$$\ker E^{-1} = E^T$$

Neodvisne komponente & PCA

Enakomerna porazdelitev



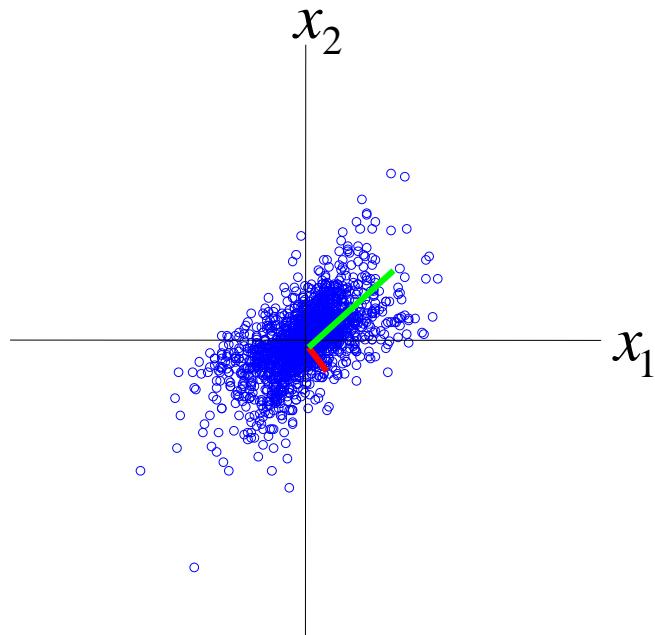
mešanica izvorov



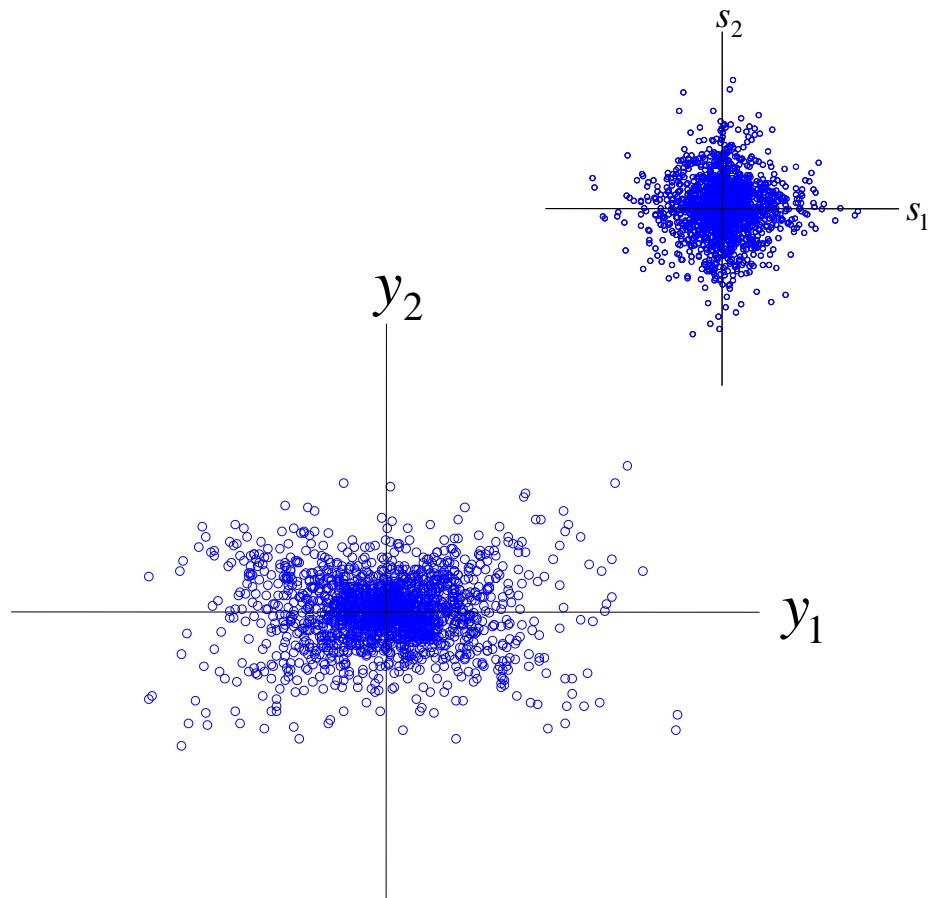
poglavitne komponente

Neodvisne komponente & PCA

Laplaceova porazdelitev



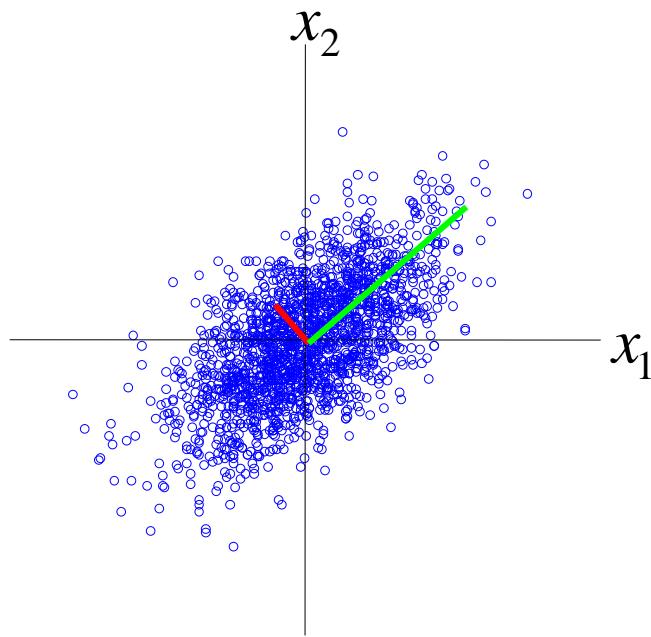
mešanica izvorov



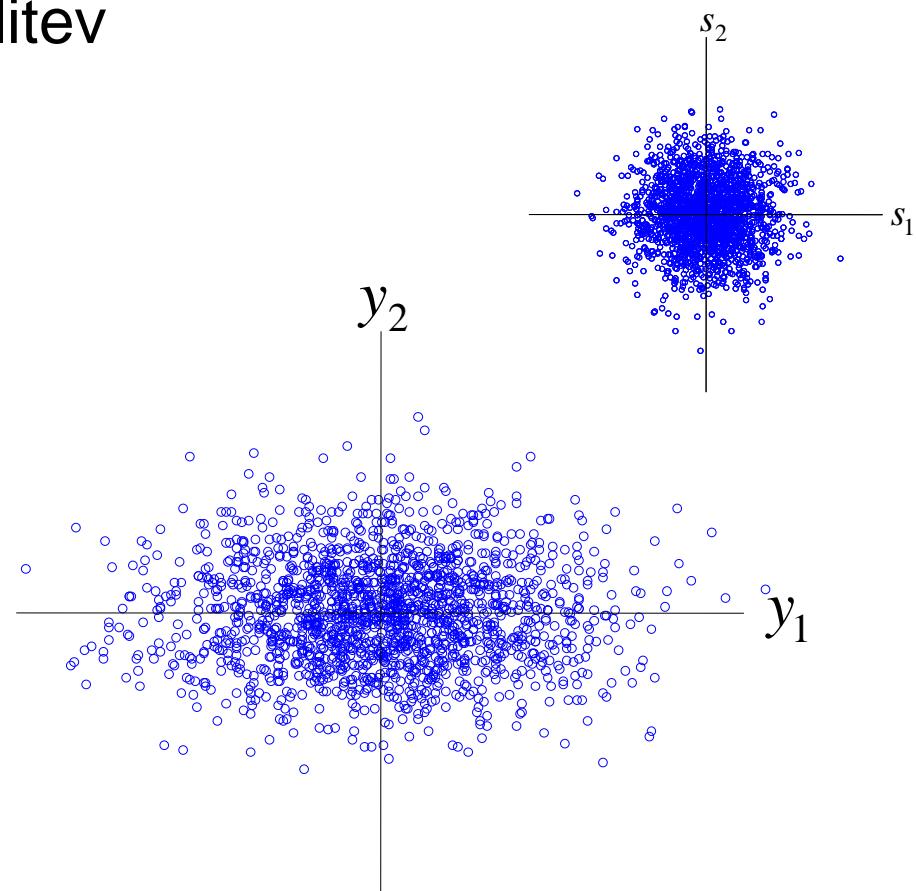
poglavitne komponente

Neodvisne komponente & PCA

Normalna (Gaussova) porazdelitev



mešanica izvorov



poglavitne komponente

Nekoreliranost in prostorsko beljenje

- Pobeljene komponente:
 - so nekorelirane (tako kot pri PCA)
 - imajo varianco enako 1
- Beljenje je razširitev analize PCA:

PCA:

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{Px}[n]$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{E}^T$$

Beljenje:

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{Vx}[n]$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{E}^T$$

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}[n]\mathbf{x}^T[n] = \mathbf{C}_x = \mathbf{EDE}^T$$

Beljenje je le polovica analize ICA

- po definiciji: $\mathbf{y}[n] = \mathbf{V}\mathbf{x}[n]$, $\mathbf{V} = \mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{E}^T$

$$\begin{aligned}\mathbf{C}_y &= \mathbf{V}\mathbf{C}_x\mathbf{V}^T \\ &= (\mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{E}^T)(\mathbf{E}\mathbf{D}\mathbf{E}^T)(\mathbf{E}\mathbf{D}^{-1/2}) \\ &= \mathbf{D}^{-1/2}(\mathbf{E}^T\mathbf{E})\mathbf{D}(\mathbf{E}^T\mathbf{E})\mathbf{D}^{-1/2} \\ &= \mathbf{I}\end{aligned}$$

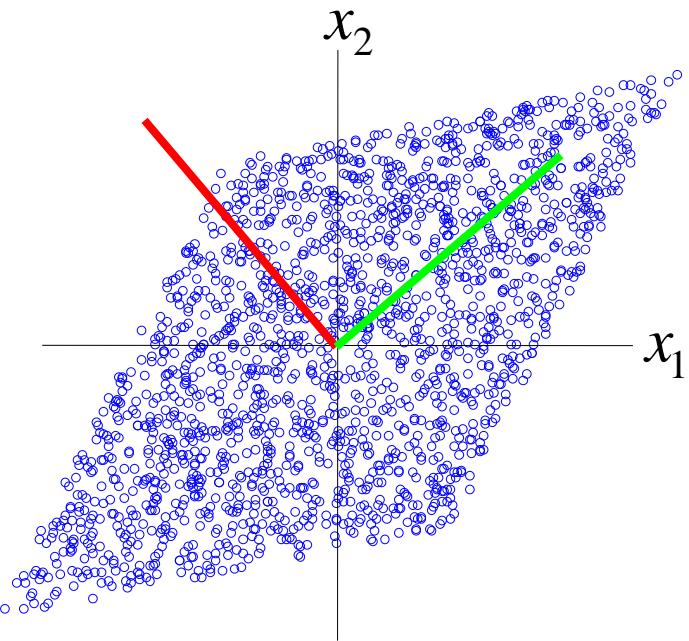
za unitarno matriko \mathbf{U} imamo

$$\mathbf{z}[n] = \mathbf{U}\mathbf{y}[n] \Rightarrow \mathbf{C}_z = \mathbf{U}\mathbf{C}_y\mathbf{U}^T = \mathbf{U}\mathbf{U}^T = \mathbf{I}$$

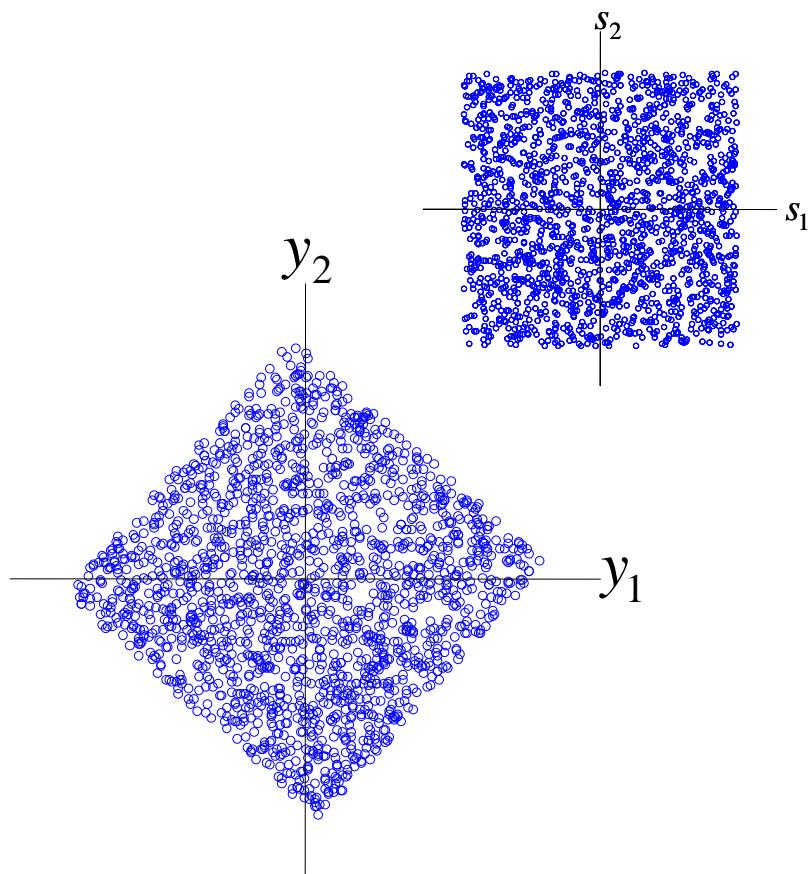
(unitarna matrika \mathbf{U} ustreza rotaciji)

Beljenje je le polovica analize ICA

Enakomerna porazdelitev



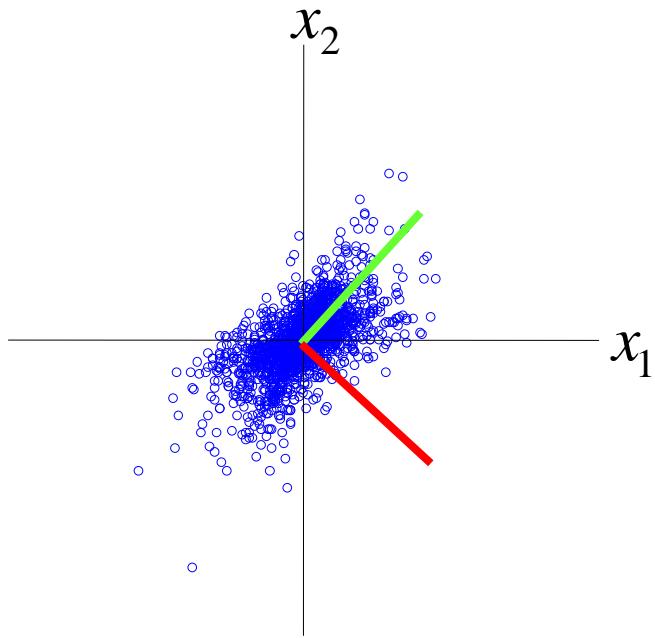
mešanica izvorov



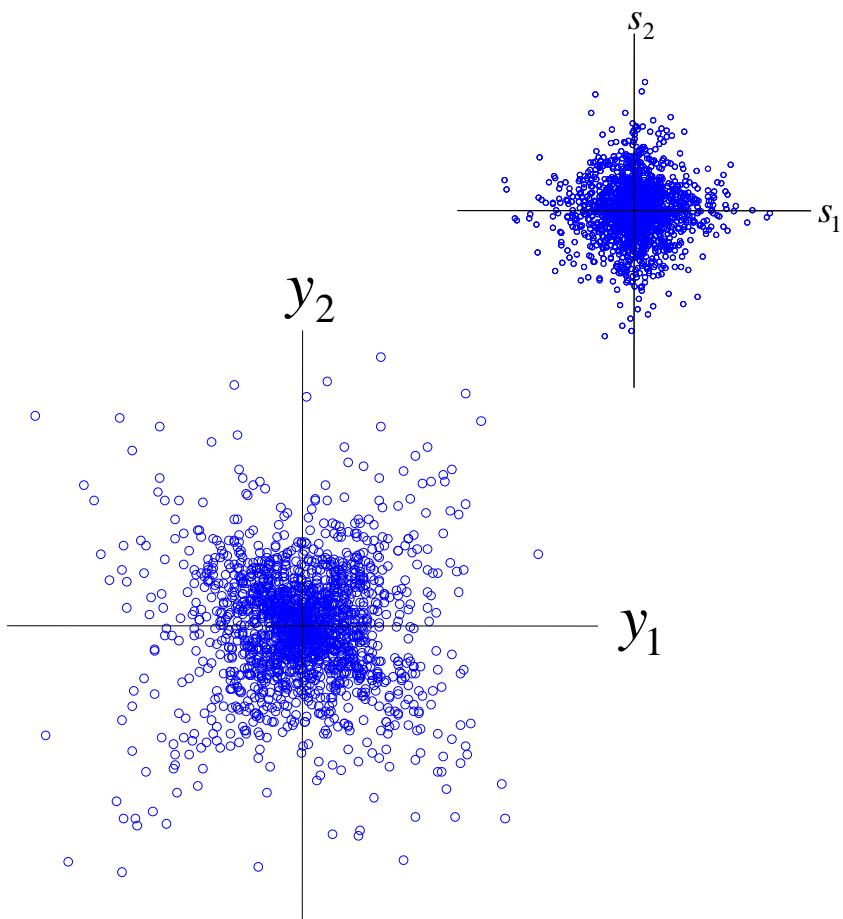
pobeljene meritve

Beljenje je le polovica analize ICA

Laplaceova porazdelitev



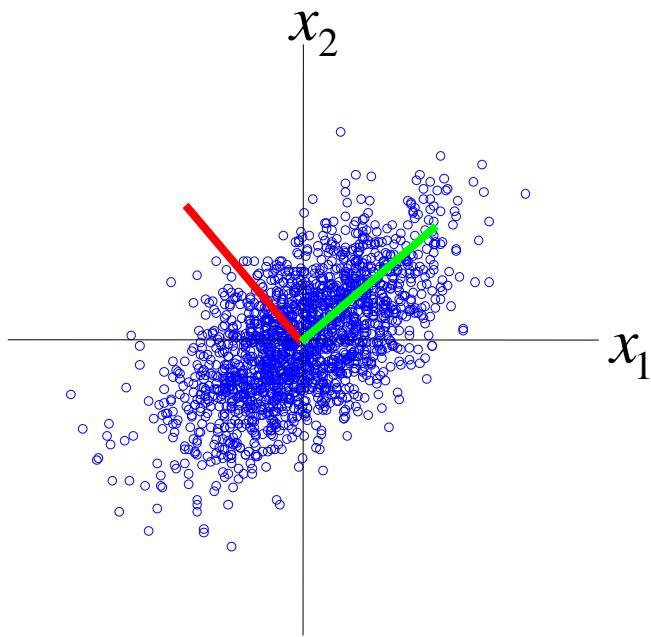
mešanica izvorov



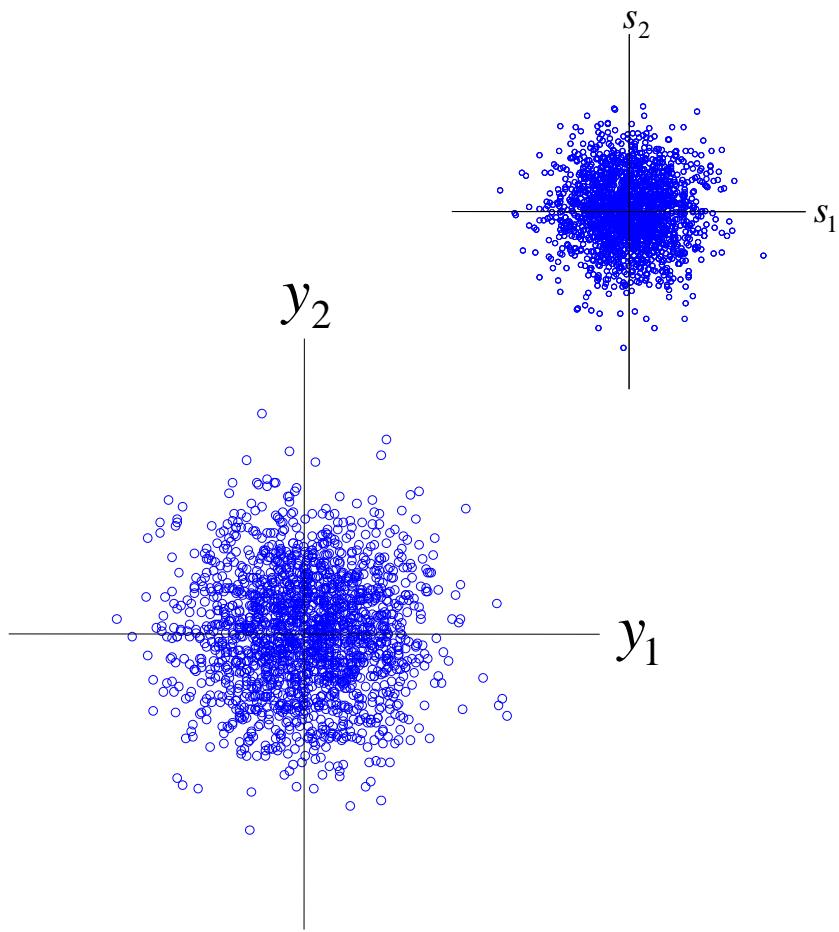
pobeljene meritve

Beljenje je le polovica analize ICA

Normalna porazdelitev



mešanica izvorov



pobeljene meritve

Normalna (Gaussova) porazdelitev je invariantna na rotacijo, zato so izvori z normalno porazdelitvijo v analizi ICA prepovedani

ICA je več kot beljenje

- neodvisne naključne spremenljivke se vedno nekorelirane

$$E(y_1 y_2) = E(y_1) E(y_2)$$

matematično upanje (v praksi
povprečna vrednost)

- nekorelirane naključne spremenljivke niso nujno neodvisne

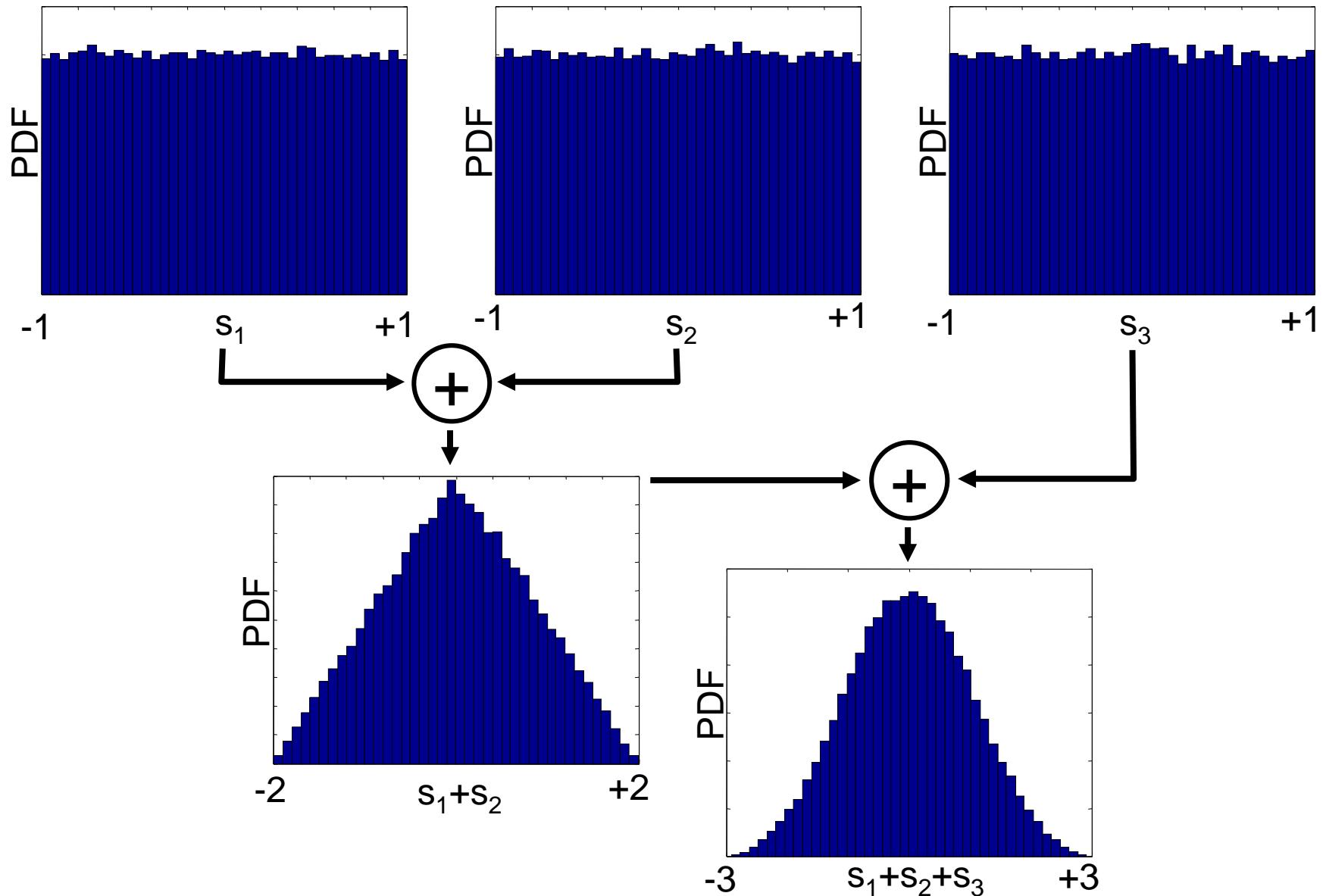
□ zgled: $(y_1, y_2) = \{(0,1), (0,-1), (1,0), (-1,0)\}$

- kriterij neodvisnosti:

$$E(f(y_1)f(y_2)) = E(f(y_1)) E(f(y_2))$$

kjer je $f(\cdot)$ katerakoli nelinearna funkcija (npr.
 $f(y)=y^2, f(y)=|y|$)

Nenormalnost je neodvisnost



Nenormalnost je neodvisnost

■ Centralni limitni teorem:

- porazdelitev vsote neodvisnih spremenljivk limitira h Gaussovi (normalni) porazdelitvi
- porazdelitev vsote neodvisnih spremenljivk

$$a_1 s_1 + a_2 s_2 + \dots + a_K s_K$$

postane najmanj Gaussova, ko je vsota natanko enaka enemu izmed izvorov s_i t.j., ko so vsi a_i razen enega enaki 0.

■ Ideja: *minimiziraj gaussovskost ocenjenega izvora*

$s_i = \mathbf{w}_i^T \mathbf{x}$, kjer je \mathbf{w}_i separacijski vektor, ki ga moramo določiti.

Merila negaussovskosti:

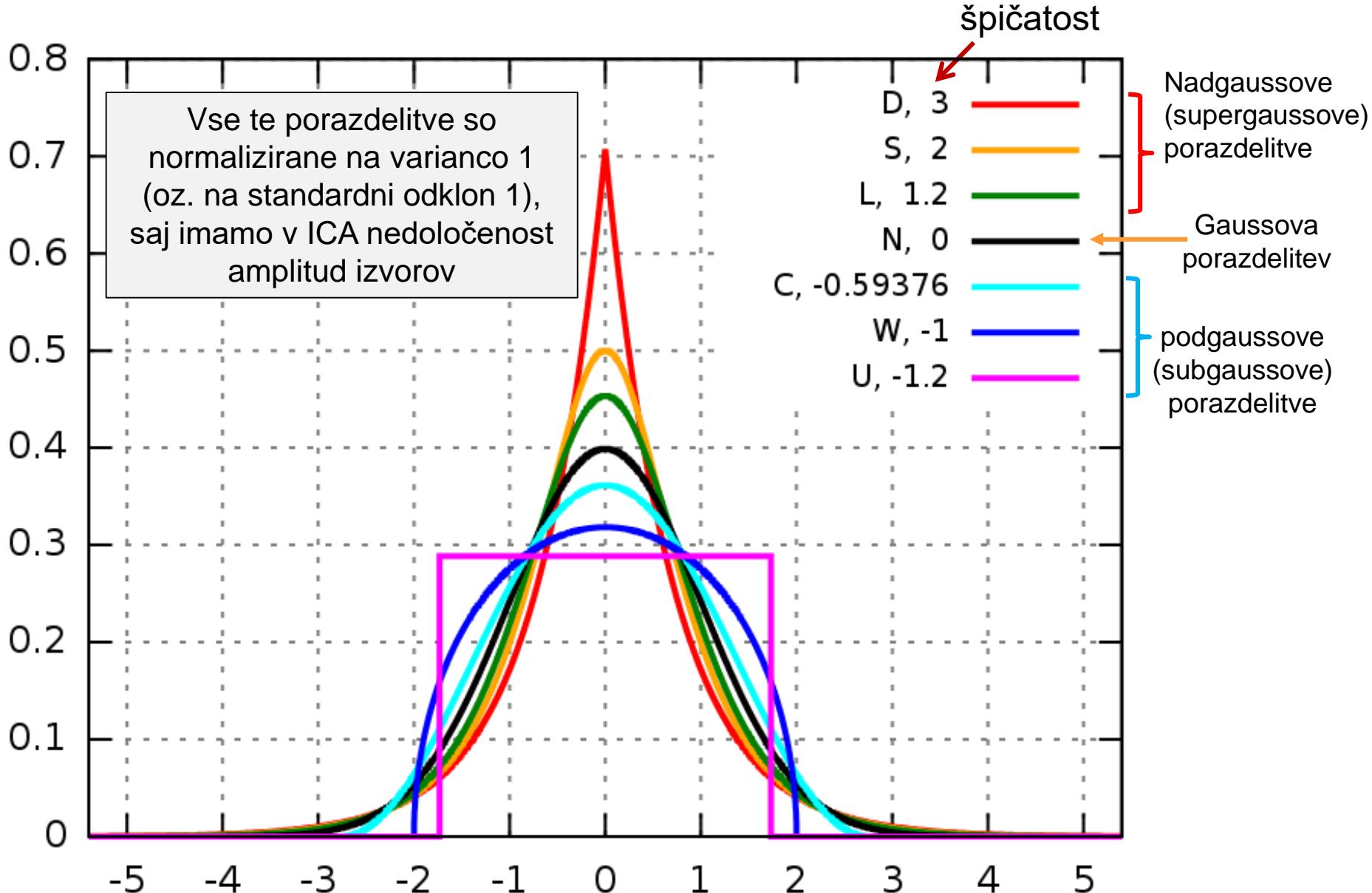
Špičatost (kurtosis)

$$kurt(s_i) = E\{s_i^4\} - 3(E\{s_i^2\})^2$$

- Špičatost je 0 za Gaussove naključne spremenljivke
- Če ima s varianco enako 1 ($E\{s^2\}=1$), potem je

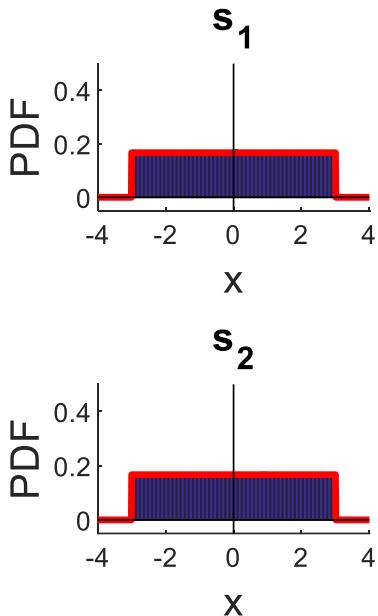
$$kurt(s_i) = E\{s_i^4\} - 3$$

Špičatost & gostota verjetnosti (PDF)

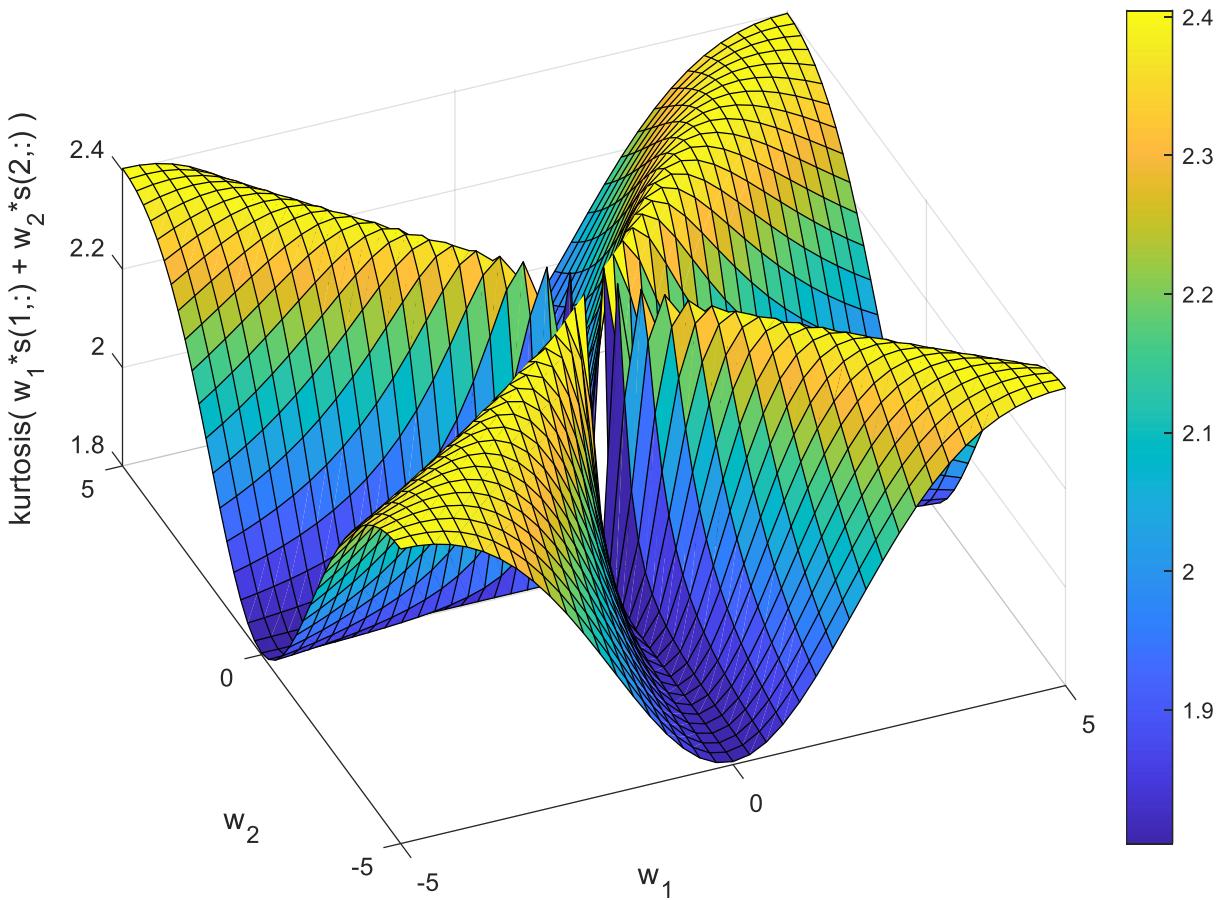


Špičatost & ločitev izvorov

Enakomerna
porazdelitev
amplitud
vzorcev izvorov



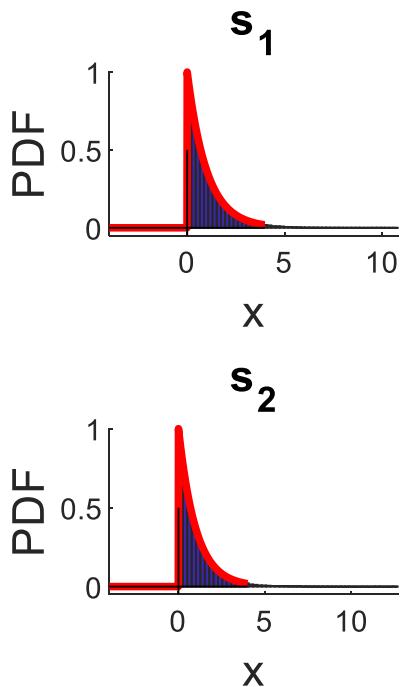
Vrednost špičatosti pri različnih
linearnih kombinacijah izvorov



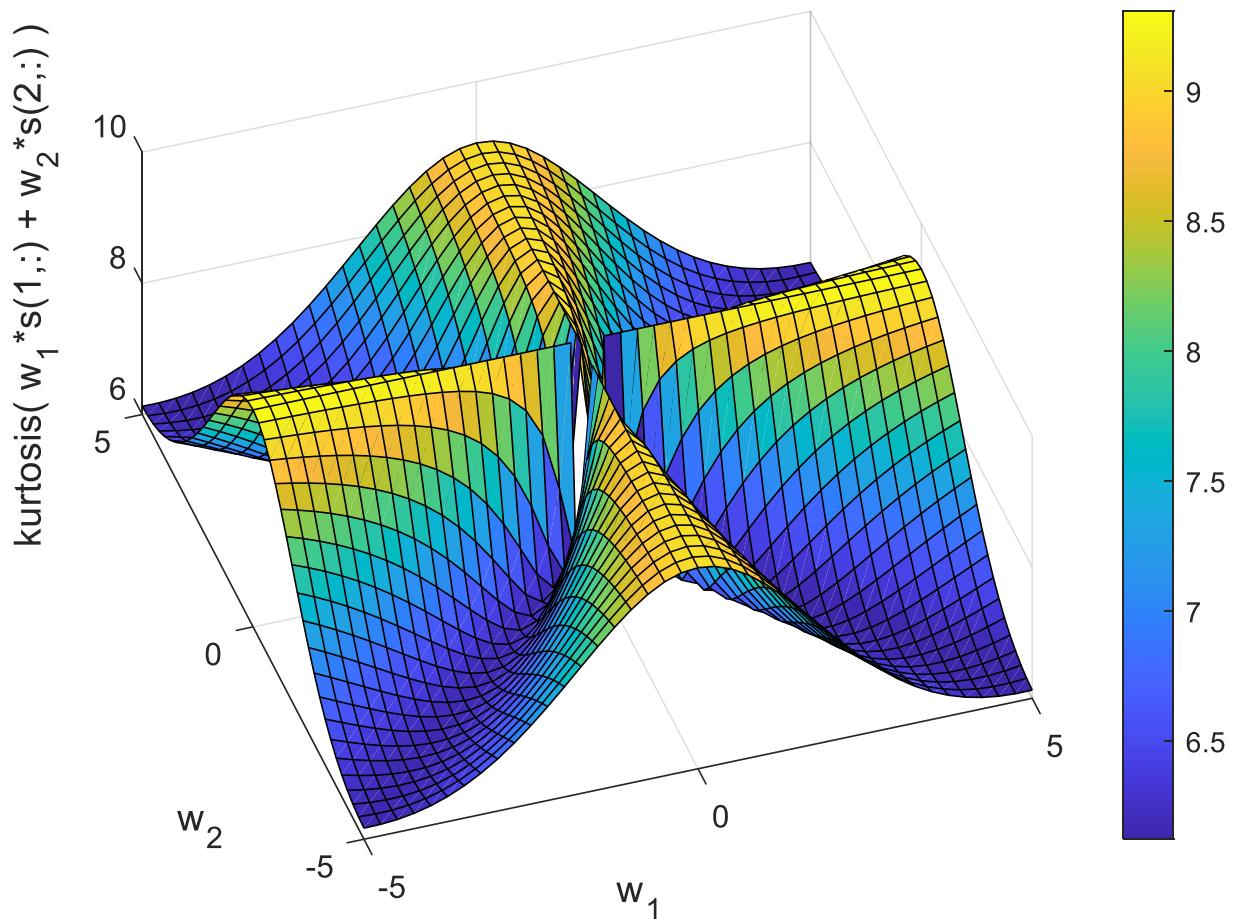
Ker špičatost uporabimo za iskanje maksimumov in minimumov, lahko
izpustimo tudi odštevanje „-3“ in uporabimo samo $E\{s_i^4\}$

Špičatost & ločitev izvorov

Eksponentna
porazdelitev
amplitud
vzorcev izvorov

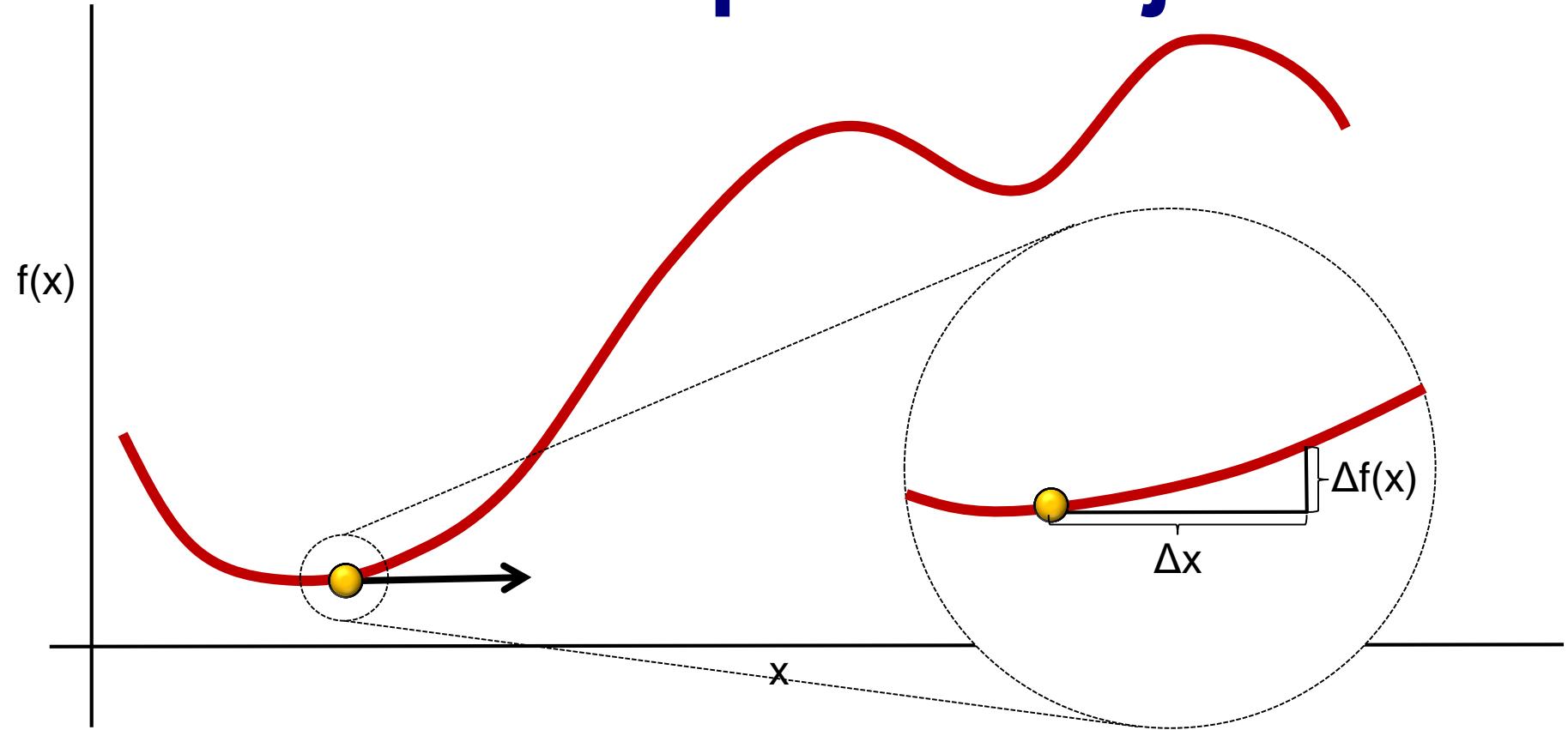


Vrednost špičatosti pri različnih
linearnih kombinacijah izvorov



Ker špičatost uporabimo za iskanje maksimumov in minimumov, lahko
izpustimo tudi odštevanje „-3“ in uporabimo samo $E\{s_i^4\}$

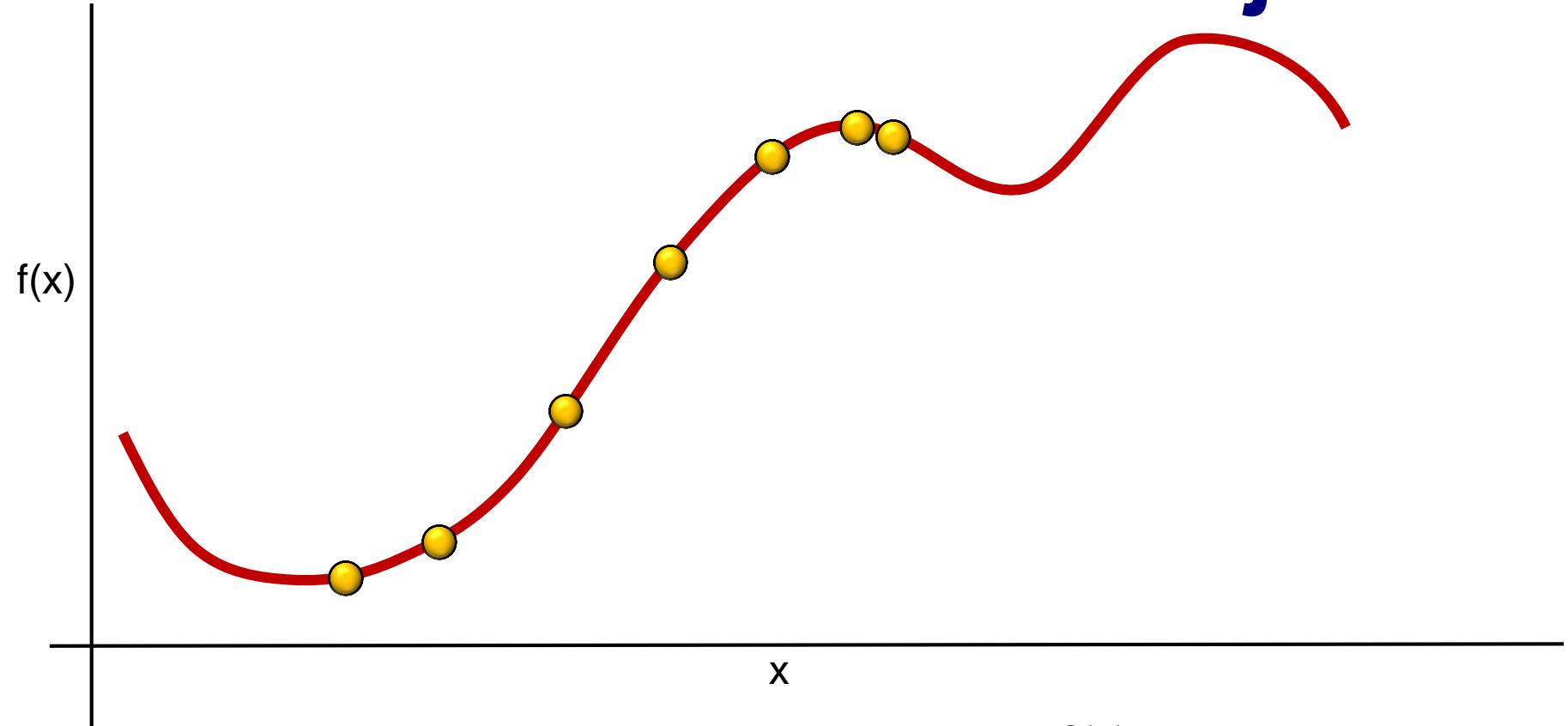
Gradientna optimizacija



$$\text{gradientna maksimizacija: } x = x + \frac{\Delta f(x)}{\Delta x}$$

$$\text{gradientna minimizacija: } x = x - \frac{\Delta f(x)}{\Delta x}$$

Gradientna maksimizacija

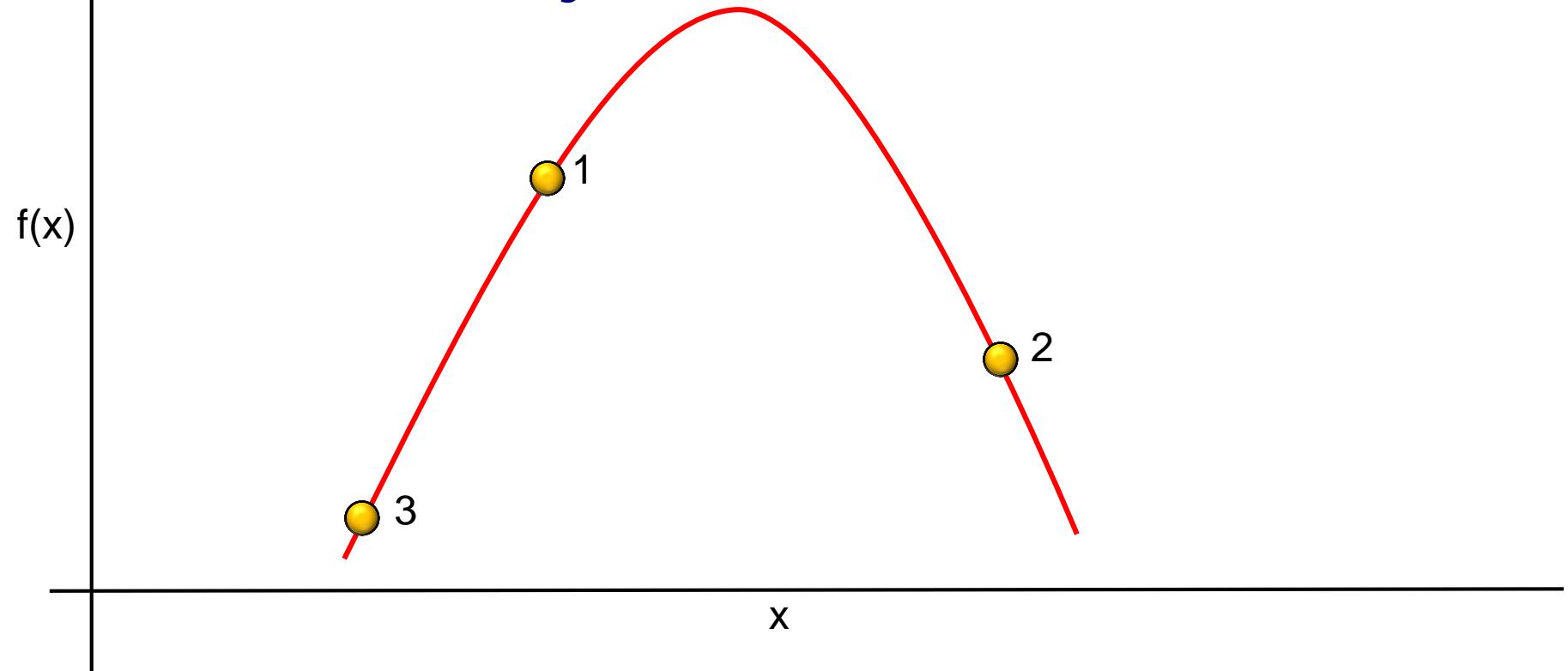


$$\text{gradientna maksimizacija: } x = x + \frac{\Delta f(x)}{\Delta x}$$

Pojasnite dolžino koraka ob vsakem skoku. Od česa je odvisna dolžina skoka?

Lokalni vs. globalni optimum?

Problem prevelikih korakov pri gradientni maksimizaciji

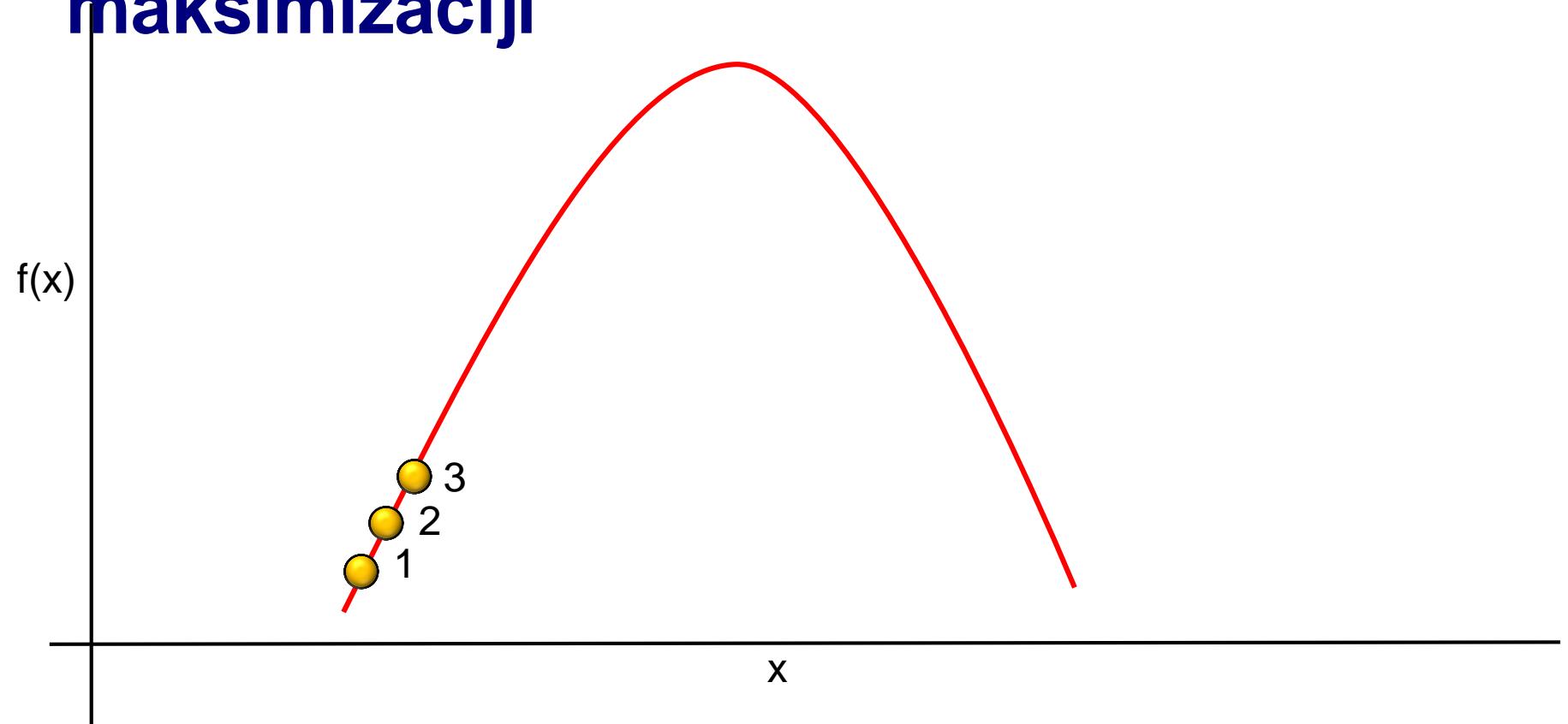


gradientna maksimizacija: $x = x + \alpha \frac{\Delta f(x)}{\Delta x}$ $\alpha > 1$

Pojasnite dolžino koraka ob vsakem skoku. Od česa je odvisna dolžina skoka?

Lokalni vs. globalni optimum?

Problem premajhnih korakov pri gradientni maksimizaciji



gradientna maksimizacija: $x = x + \alpha \frac{\Delta f(x)}{\Delta x}$ $\alpha \ll 1$

Pojasnite dolžino koraka ob vsakem skoku. Od česa je odvisna dolžina skoka?

Lokalni vs. globalni optimum?

Gradientni pristop k optimizaciji: (\mathbf{x} – dve meritvi, trenutno ocenjujemo en izvor)

1. Inicializiramo ločitveni vektor: $\mathbf{w}_i = [1, 0]$

2. Rekonstruiramo i-ti izvor s_i : $s_i(n) = \mathbf{w}_i^T \mathbf{x}(n)$

3. Osvežimo ločitveni vektor: $\mathbf{w}_i = \mathbf{w}_i + \alpha \frac{\partial f(s_i(n))}{\partial \mathbf{w}_i}$

4. Normaliziramo ločitveni vektor: $\mathbf{w}_i = \frac{\mathbf{w}_i}{\|\mathbf{w}_i\|}$
(da preprečimo trivialno rešitev $\mathbf{w}_i = \mathbf{0}$)

$f(s_i(n))$ - skalarna meritna funkcija, npr. *kurt*

optimizacija

Gradientni pristop k optimizaciji: špičatost (zanemarimo -3 v enačbi špičatosti)

$$f(s_i) = E\{s_i^4\} = \frac{1}{N} \sum_n s_i^4[n]$$

$$s_i[n] = \mathbf{w}_i^T \mathbf{x}[n]$$

$$\frac{\partial f(s_i)}{\partial \mathbf{w}_i} = \frac{\partial f(s_i)}{\partial s_i} \frac{\partial s_i}{\partial \mathbf{w}_i} = 4E\{s_i^3 \mathbf{x}\}$$

$$= 4 \frac{1}{N} \sum_n s_i^3[n] \mathbf{x}[n]$$

2. Osvežimo ločitveni vektor: $\mathbf{w}_i = \mathbf{w}_i + \alpha 4 \frac{1}{N} \sum_n (s_i^3[n] \cdot \mathbf{x}[n])$

Gradientni pristop k optimizaciji: špičatost (x – dve meritvi, trenutno ocenjujemo en izvor)

1. Inicializiramo ločitveni vektor: $\mathbf{w}_i = [1, 0]$

2. Rekonstruiramo i-ti izvor s_i : $s_i = \mathbf{w}_i^T \mathbf{x}$

3. Osvežimo ločitveni vektor: $\mathbf{w}_i = \mathbf{w}_i + \alpha 4 \frac{1}{N} \sum_n (s_i^3[n] \cdot \mathbf{x}[n])$

4. Normaliziramo ločitveni vektor:
(da preprečimo trivialno rešitev $\mathbf{w}_i = \mathbf{0}$)

$$\mathbf{w}_i = \frac{\mathbf{w}_i}{\|\mathbf{w}_i\|}$$

Iterativno ponavljamo korake 2-4, dokler se s_i spreminja

optimizacija

Primer predstavljene gradientne optimizacije:



<http://research.ics.tkk.fi/ica/fastica/>

Praktične opombe

- Predobdelava s filtriranjem je dovoljena!
 - filtriranje ohranja mešalni model (mešalno matriko)
 - zmanjša šum
- Predobdelava z analizo PCA je dovoljena!
 - zmanjša dimenzijo problema (odstrani nepotrebne meritve)
 - zmanjša šum
- Izbira algoritma ICA:
 - sočasna ocenitev vseh izvorov vs. sekvenčna ocenitev posameznih izvorov
 - izbira kriterijske (optimizacijske) funkcije: špičatost, negentropija, Kullback–Leiblerjeva divergenca, maxinfo,...
 - realnočasovna vs. paketna ločitev izvorov

Ločitev izvorov z uporabo časovne strukture

- osnovna premla analize ICA

$$\forall \Delta n; E\{\mathbf{x}[n]\mathbf{x}^T[n + \Delta n]\} = 0$$

$$\forall \Delta n; E\{\mathbf{x}[n]\mathbf{x}^T[n]\} = E\{\mathbf{x}[n + \Delta n]\mathbf{x}^T[n + \Delta n]\}$$

- signali navadno vsebujejo več strukture kot naključne spremenljivke

- ločitev s pomočjo avtokovariance:

$$E\{\mathbf{x}[n]\mathbf{x}^T[n + \Delta n]\} \neq 0$$

- ločitev s pomočjo nestacionarnosti:

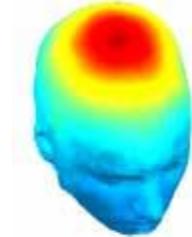
$$E\{\mathbf{x}[n]\mathbf{x}^T[n]\} \neq E\{\mathbf{x}[n + \Delta n]\mathbf{x}^T[n + \Delta n]\}$$

Primer ločitve izvorov s pomočjo avtokovariance:

SOBI

dostopen v sklopu

EEGLAB



<http://sccn.ucsd.edu/eeglab/>

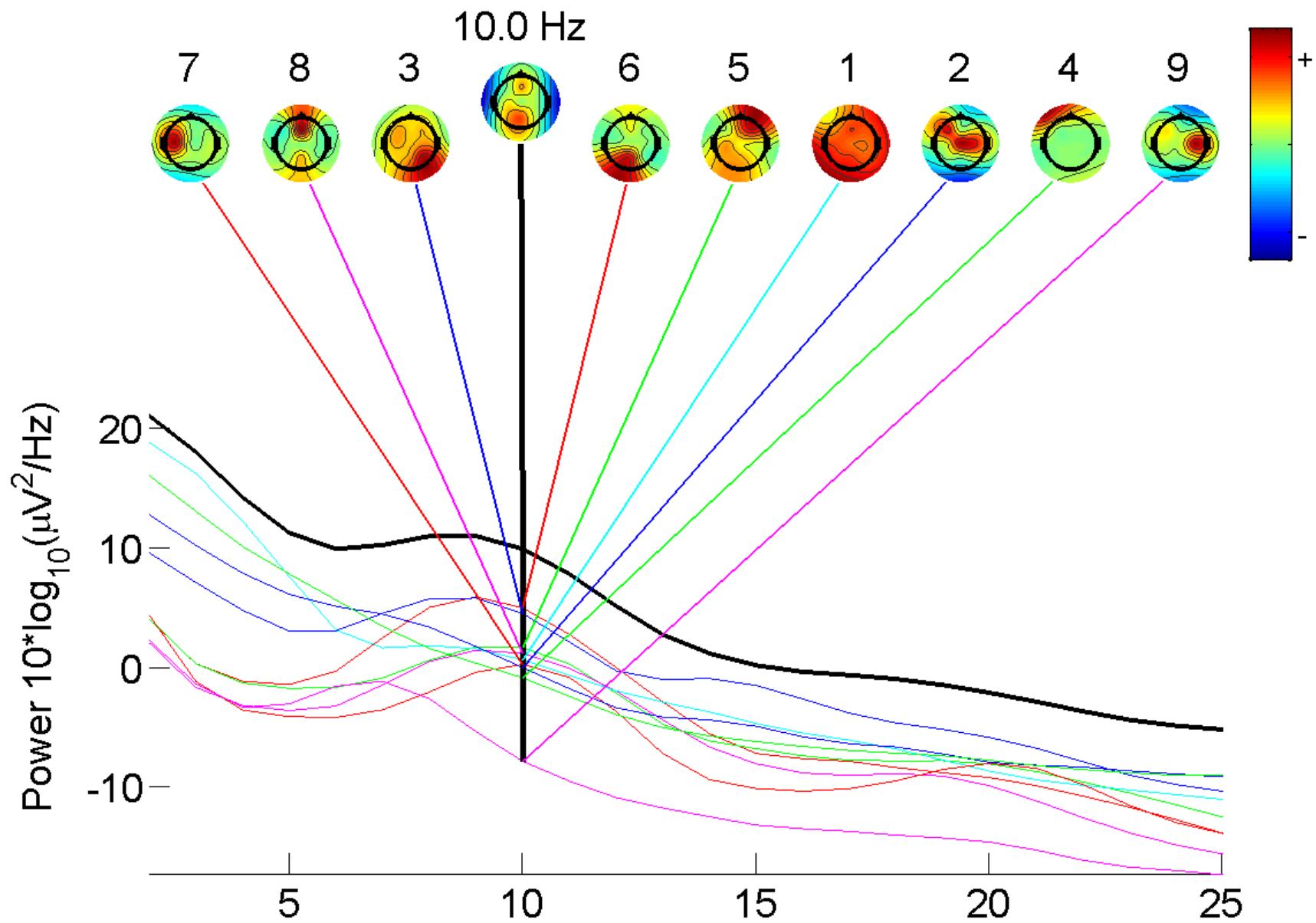
Študijski material:

- Aapo Hyvärinen and Erkki Oja: Independent Component Analysis: A Tutorial
http://www.cis.hut.fi/aapo/papers/IJCNN99_tutorialweb/
(zelo nazorno učno gradivo pionirjev analize ICA)
- fastICA: <http://www.cis.hut.fi/projects/ica/fastica/>
(prostodostopeno orodje fastICA)
- J. F. Cardoso: ICA
<http://www.tsi.enst.fr/~cardoso/guidesepsou.html>
(spletna stran J. F. Cardosa, pionirja analize ICA)

PRIMERI IZ LITERATURE:

ICA APPLICATIONS: BIOMEDICAL SIGNALS

Možganski centri in njihovi prispevki k EEG



Brainmusic: fmri into musical sound

LISTENING TO THE DYNAMIC BRAIN

<http://www.youtube.com/watch?v=FX19mNKoXeo&feature=related>

Acoustic Blind Source Separation

<http://www.youtube.com/watch?v=Qr74sM7oqQc&feature=related>

Acoustic Blind Source Separation

<http://www.youtube.com/watch?v=b2TTxe25Om0>

Visual Blind Source Separation

<http://cnx.org/content/m15640/latest/>

Two-dimensional deconvolution

http://www.cs.technion.ac.il/~mbron/research_bss.html