

Neuronální kódování a přenos informace

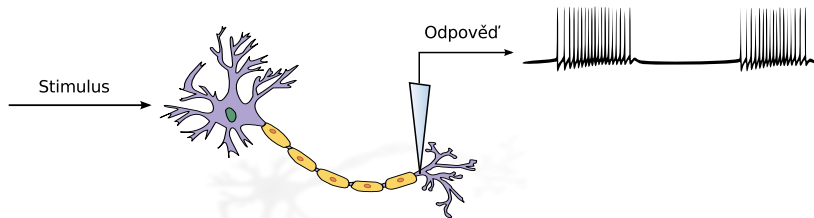
Lubomír Košťál
Fyziologický ústav AV ČR



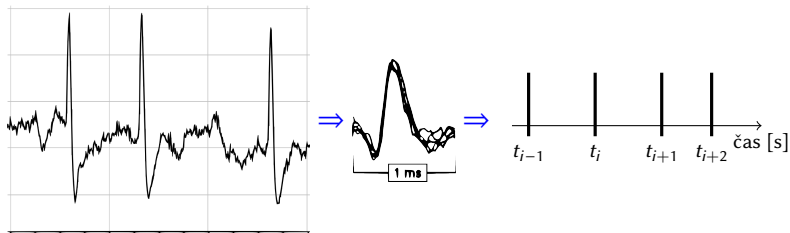
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Matematické modely a aplikace, Podlesí 2013

PROBLÉM NEURONÁLNÍHO KÓDOVÁNÍ

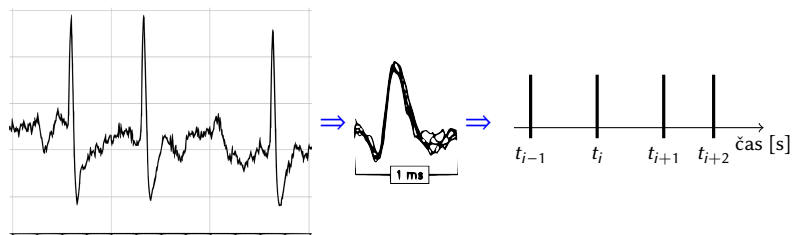


PROBLÉM NEURONÁLNÍHO KÓDOVÁNÍ



- ▶ Hodgkin & Huxley (1952): matematický model neuronu
- ▶ Adrian (1926): počet pulzů (AP) za zvolený čas
- ▶ Perkel & Bullock (1968): intervaly mezi AP, jejich statistiky, ...
- ▶ Stein *et al.*, *Nat. Rev. Neurosci.* (2005): co je šum a co signál?
- ▶ 2013: umíme “přečíst” neuronální kód? **NE!**

PROBLÉM NEURONÁLNÍHO KÓDOVÁNÍ

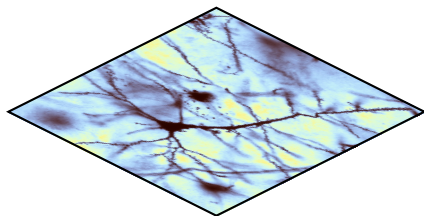


Lze neuronální kód analyzovat metodami *sduženého* kódování z teorie informace?

“Neuron” {
Matematické modely (*stoch. dif. rovnice*)
Experimentální data

MODELŮ NEURONŮ

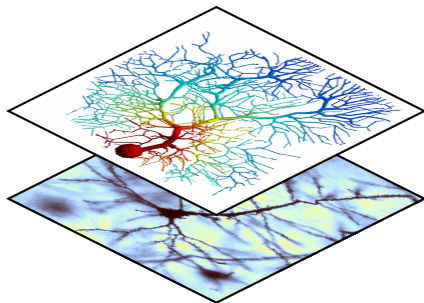
Realita



MODELY NEURONŮ

3D biofyzikální

Realita

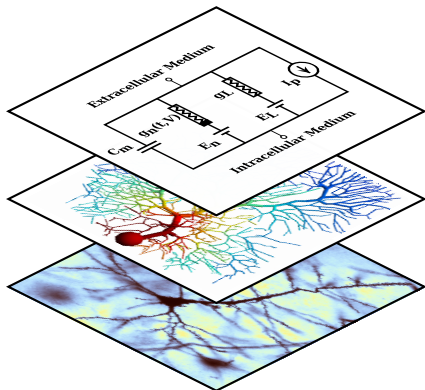


MODELY NEURONŮ

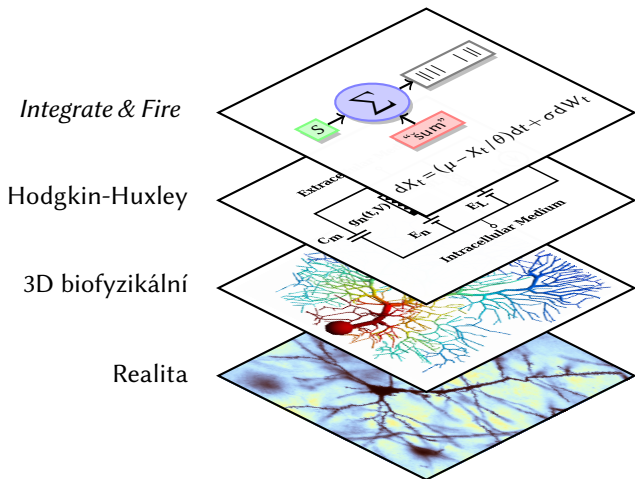
Hodgkin-Huxley

3D biofyzikální

Realita

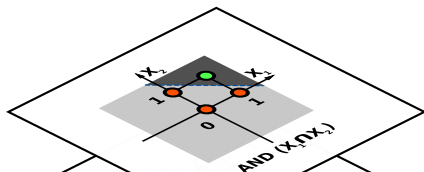


MODELY NEURONŮ

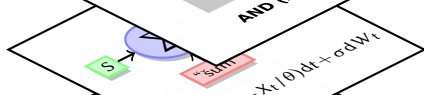


MODELY NEURONŮ

Binární “neuron”



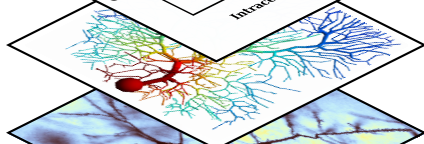
Integrate & Fire



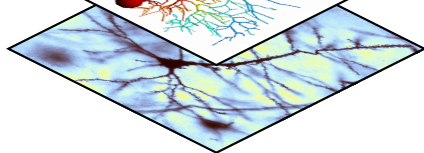
Hodgkin-Huxley



3D biofyzikální



Realita



MODELY NEURONŮ

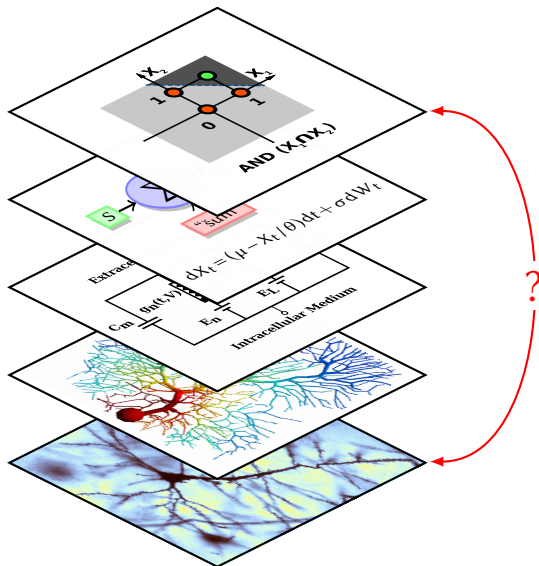
Binární "neuron"

Integrate & Fire

Hodgkin-Huxley

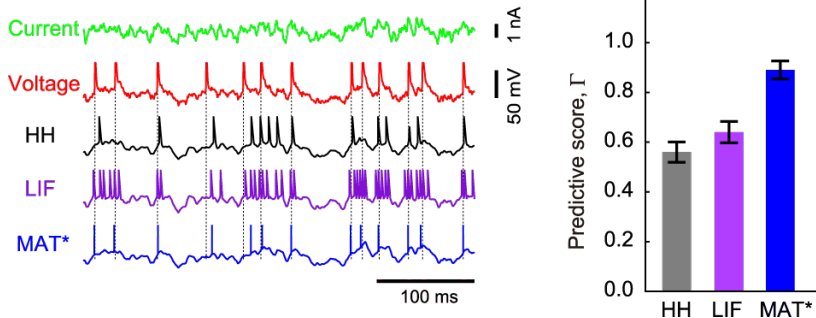
3D biofyzikální

Realita



JAK “DOBŘÉ” JSOU NEURONÁLNÍ MODELY?

Ryota Kobayashi: *Quantitative Neuron Modeling* (INCF 2009 prize)



Kobayashi et al., *Front. Comput. Neurosci.* (2009)

Jolivet et al., *J. Neurosci. Methods* (2008); Gerstner & Naud, *Science* (2009)

INFORMACE A KÓD

- ▶ *Informace:*
 - ▶ Teorie informace (komunikace): C. E. Shannon (1948)
 - ▶ Popis *zdroje* a *přenosu* informace
 - ▶ Míra informace: [bit]

INFORMACE A KÓD

▶ *Informace:*

- ▶ Teorie informace (komunikace): C. E. Shannon (1948)
- ▶ Popis *zdroje a přenosu* informace
- ▶ Míra informace: [bit]

▶ *Kód:*

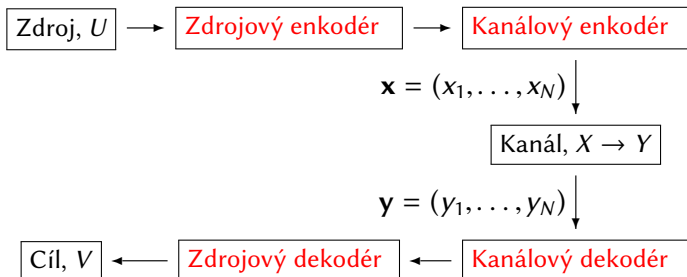
1. Šifra ✗
2. Relevantní část neuronálního signálu ✓
3. Kódovací-dekódovací “algoritmus” pro 2. ✓

INFORMACE A KÓD

- ▶ *Informace:*
 - ▶ Teorie informace (komunikace): C. E. Shannon (1948)
 - ▶ Popis *zdroje a přenosu* informace
 - ▶ Míra informace: [bit]
- ▶ *Kód:*
 1. Šifra ✗
 2. Relevantní část neuronálního signálu ✓
 3. Kódovací-dekódovací “algoritmus” pro 2. ✓
- ▶ Teorie informace a neurovědy:
 - ▶ 50. léta (modely?)
 - ▶ Poslední cca 1-2 dekády: *IEEE Trans. Info. Theory* 2010, *Information beyond Shannon* 2013, ...

TEORIE INFORMACE

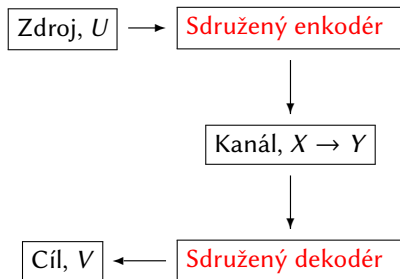
- Fundamentální limity na efektivitu: *i) reprezentace a ii) spolehlivé komunikace* informace ze zdroje



- **Separace**: tradiční pohled, výhodné (praktické dopady)
- Efektivita “asymptoticky” dosažitelná separací nemůže být překonána *jakýmkoliv jiným* způsobem (Shannon, 1948)

TEORIE INFORMACE

- ▶ Fundamentální limity na efektivitu: *i) reprezentace a ii) spolehlivé komunikace* informace ze zdroje



- ▶ I když nelze překonat *fundamentální* limity, může přinést řadu výhod (komplexita kódů, sítě, ...)
- ▶ Oproti *separaci* méně prozkoumáno, *ad hoc* přístupy

ILUSTRACE SEPAROVANÉHO VS. SDRUŽENÉHO KÓDU

Zdroj $U \rightarrow V$ (1 symb/s): $U \sim N(0, \sigma_U^2)$, $E(U - V)^2 \leq D$

Kanál $X \rightarrow Y$ (1 symb/s): $Y = X + Z$, $Z \sim N(0, \sigma_Z^2)$, $EX^2 \leq P$

Separované kódování (*tradiční přístup*)

a) ztrátová komprese U při středním zkreslení D : min. $R(D)$ bit/s

b) spolehlivý přenos informace kanálem: max. $C(P)$ bit/s

Optimum: $R(D) = C(P)$ a tedy (pro zdroj a kanál výše)

$$D = \frac{\sigma_U^2 \sigma_Z^2}{P + \sigma_U^2}$$

Blokové kódy, komplexita dekódování, ...

Dosažitelnost $R(D)$ a $C(P)$? Pouze *asymptoticky* s délkou bloků!

Zobrazení $U \rightarrow V$ je “deterministické”.

ILUSTRACE SEPAROVANÉHO VS. SDRUŽENÉHO KÓDU

Zdroj $U \rightarrow V$ (1 symb/s): $U \sim N(0, \sigma_U^2)$, $E(U - V)^2 \leq D$

Kanál $X \rightarrow Y$ (1 symb/s): $Y = X + Z$, $Z \sim N(0, \sigma_Z^2)$, $EX^2 \leq P$

Sdružené “kódování”

Pouhým škálováním vstupů a výstupů (*symbol-per-symbol*):

$$X = \sqrt{\frac{P}{\sigma_U^2}} U, \quad V = \sqrt{\frac{\sigma_U^2}{P}} \frac{P}{P + \sigma_Z^2} Y, \quad D = E(U - V)^2 = \frac{\sigma_U^2 \sigma_Z^2}{P + \sigma_U^2}$$

Asymptotická optimalita (separace) dosažena *bez kódování!*

Zobrazení $U \rightarrow V$ je *stochastické*.

Téma: pozitivní role šumu

Proti šumu “nebojujeme”, naopak jeho specifickou formu požadujeme (*stochastická rezonance, ...*).

MOŽNÉ VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ

Teorie informace

- ▶ Historicky: *separace*, avšak vývoj v posledních dvou dekadách!
- ▶ Možné řešení některých “tradičních” problémů?
(*feedback a paměť, omezená komplexita kódu, síť, ...*)

Neurovědy (*neuronální* \Leftrightarrow *sdužený kód?*)

- ▶ Dosavadní aplikace teorie informace v neurovědách: **separace**
- ▶ *Ne-univerzalita* neuronálního kódu: **možné pojítko?**
(alespoň pro sensorické neurony)

Aplikace (*inspirace neurony*)

- ▶ Digitální svět + různé zdroje \Rightarrow **separace**
- ▶ Mobilní sensory a jejich síť, analog. zdroje \Rightarrow **sdužení**

ZÁVĚRY

- ▶ Metodika početních neurověd: teorie vázaná na experiment
- ▶ Pochopení principů neuronálního kódování: **nové koncepce** (stochastické algoritmy)
- ▶ “Inspirace” biologickou realitou: ne *trochu* ale **fundamentálně** odlišné kódování (digitální separované vs. sdružené kódy)
- ▶ Nejsložitější modely nejsou nutně nejlepší
- ▶ Kód dědičné informace (univerzalita) vs. neuronální kód

