

## ŤAŽKOSTI S HĽADANÍM CHAOSU V EEG A EKG

Anna Krakovská

Elektrokardiogram a elektroencefalogram patria k veľmi zaujímavým signálom. Majú črty periodicity, ale zároveň sú pomerne nepravidelné. Zistenie zdrojov nepravidelností je dôležité pre pochopenie príslušnej dynamiky. Aj keď napr. srdce je zložitý orgán a na jeho činnosť vplyva množstvo faktorov (dýchanie, vplyv okolia a pod.), nemožno vylúčiť ani možnosť, že tu zohráva svoju úlohu samoorganizácia do nízkorozmerného deterministického systému so zdanlivo komplikovanou dynamikou. Mnohé pozorovania ukazujú, že v prípade srdcovej dynamiky máme neraz do činenia s prepínaním medzi kvalitatívne odlišnými typmi správania, podobne, ako je tomu v nelineárnych dynamických systémoch. Dochádza k zdvojnásobeniu periódy, nastúpi arytmia, fibrilácia a pod. Elektrická stimulácia kuracích embrií [1] napr. viedla ku vzorom, pripomínajúcim z teórie známu cestu ku chaosu - postupnosť zdvojovania periód. Pri experimentoch však vzory náhle zanikli, namiesto toho, aby vyústili do chaotického správania. Takisto nebolo pozorované, aby fibrilácii predchádzali vzory, pripomínajúce teoretickú cestu ku chaosu.

K priekopníkom v modelovaní srdcovej aktivity patrili Van der Pol a Van der Mark. V dvadsiatych rokoch zistili, že nelineárne oscilátory dobre reprezentujú činnosť srdca [2]. Bifurkačná analýza ich periodicky budeného systému ukazuje, že pri určitých parametroch je dynamika periodická, pri iných chaotická [3]. Existujú aj ďalšie modely srdca, väčšinou ide o systém troch, alebo štyroch nelineárnych diferenciálnych rovníc [4]. Chýba ale objav konkrétnej sústavy rovníc, ktorá by presvedčivo simulovala dynamiku srdca a pri zmenách parametrov generovala celú klinicky pozorovanú škálu EKG signálov. Systém by musel brať do úvahy aj interakciu s rôznymi formami šumu, ktoré sú prirodzenou súčasťou všetkých biologických experimentov. Doteraz existujúce modely síce vyzerajú sľubne, nie sú ale na takej úrovni, aby mohli byť pre medicínu podstatným prínosom.

Keď sa pýtame, či chaos zohráva nejakú úlohu v aktivite srdca, alebo mozgu, ponúka sa možnosť prejsť od jednorozmerného signálu do viacrozmerného priestoru, zrekonštruovať v ňom dynamiku systému, ktorý by mohol byť v pozadí príslušného procesu a vyšetriť zrekonštruovaný stavový portrét. Pritom často použijeme tzv. korelačnú dimenziu ( $D_2$ ). Je to charakteristika, ktorá odhalí fraktálny charakter atraktora systému a poskytne predstavu o minimálnom počte stupňov voľnosti systému a teda o najmenšom počte diferenciálnych rovníc, potrebných pre úspešné modelovanie skúmanej dynamiky [5]:

$$D_2 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\epsilon)} p_i^2}{\ln \epsilon} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln C_2(\epsilon)}{\ln \epsilon}$$

kde  $N(\epsilon)$  je počet hyperkociek s dĺžkou strany  $\epsilon$ , ktoré pokrývajú atraktor a  $p_i$  je pravdepodobnosť, že v hyperkocke  $i$  sa nachádza bod atraktora. Grassberger a Procaccia [6] si uvedomili, že  $C_2(\epsilon)$  možno chápať ako pravdepodobnosť, že vzdialenosť medzi dvomi bodmi atraktora je menšia ako  $\epsilon$ :

$$C_2(\epsilon) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_i^N \sum_{j>i}^N \Theta(\epsilon - \|x_m(i) - x_m(j)\|)$$

kde  $\theta$  je Heavisideova funkcia a  $\|\cdot\|$  je napr. maximová norma.

$D_2$  je potom miera, ktorú je možné ľahko numericky odhadnúť. Často sa pritom ale zabúda na to, že pre úspešný odhad dimenzie potrebujeme mať k dispozícii pomerne veľký počet kvalitne digitalizovaných údajov, ktoré sú málo zašumené a fyziologicky stacionárne. To sú požiadavky, ktoré je v prípade biologických meraní ťažké zaručiť. Mnohí autori poukazovali

na to, že je nanajvýš nepravdepodobné, aby bola dynamika srdcovej a mozgovej činnosti modelovateľná tak malým počtom rovníc, ako to naznačovali odhady dimenzie. Napriek tomu, korelačná dimenzia sa stala často používanou charakteristikou, pretože sa ukázalo, že zmeny v EEG a EKG sú signifikantne sprevádzané zmenami hodnôt dimenzie.

Dnes začína prevládať názor, že mnohé fyziologické signály pripomínajú viac tzv.  $1/f^\gamma$  šum, než chaotický signál. Ukázalo sa, že metóda Grassbergera a Procacciu (GP) na odhad dimenzie nedokáže odlíšiť fraktálny atraktor deterministického systému od fraktálnych náhodných kriviek. V [7] autori odvodili, že pre stochastický signál s  $1/f^\gamma$  výkonovým spektrom vedie GP-algoritmus k falošnému odhadu korelačnej dimenzie  $D_2=2/(\gamma-1)$  pre  $1<\gamma<3$ . Nízke odhady dimenzií sú teda pripisované prítomnosti škálovo invariantných, fraktálom podobných štruktúr v dátach, v pozadí ktorých ale už nehľadáme deterministický chaos, ale skôr stochastický systém typu  $1/f^\gamma$  šumu. Zmeny v systéme potom veľmi úspešne zachytáva parameter  $\gamma$ . Ten je silne korelovaný s odhadmi korelačnej dimenzie. Na rozdiel od nej je ale fraktálny exponent  $\gamma$  ľahšie odhadnuteľný a to dokonca aj z takého malého súboru dát, pre ktorý je výpočet dimenzie principiálne nerealizovateľný.

Dnes, rovnako ako pred dvadsiatimi rokmi, je podstatnejší prínos chaosu pre fyziológiu v nedohľadne. Treba ale pripomenúť, že niekoľko užitočných nových prístupov ku spracovaniu fyziologických dát sa už objavilo. Vznikli napríklad metódy redukcie šumu, ktoré sa snažia vystopovať dynamiku skúmaného systému a diskriminujú tie zložky dát, ktoré nezodpovedajú odhalenej dynamike. Tieto metódy nielen veľmi úspešne filtrujú zašumené experimentálne chaotické údaje, ale ukazuje sa, že sú dobre použiteľné aj v prípade zložitých biologických signálov, ktoré nemusia byť chaotické [8]. Na podobnom princípe, ako nelineárna redukcia šumu, je založená aj úspešná metóda separovania fetálneho EKG a materského EKG [9, 10].

*Výskum bol finančne podporovaný Grantovou agentúrou VEGA (grant č. 2/4026/04).*

#### LITERATÚRA

1. Glass, L., Hunter, P., McCulloch, A.: Theory of Heart: Biomechanics, Biophysics, and Nonlinear Dynamics of Cardiac Function. New York, Springer-Verlag, 1991, 611 s.
2. Van der Pol, B., Van der Mark, J.: Frequency demultiplication. Nature, 120, 1927, s. 363-364.
3. Mettin, R., Parlitz, U., Lauterborn, W.: Bifurcation structure of the driven Van der Pol oscillator. Int. Journal of Bifurcation and Chaos, 3, 1993, s. 1529-1555.
4. Di Bernardo, D., Signorini, M. G., Cerutti, S.: A model of two nonlinear coupled oscillators for the study of heartbeat dynamics. Int. Journal of Bifurcation and Chaos, 10, 1998, s. 1975-1985.
5. Alligood, K. T., Sauer, T. D., Yorke, J. A.: Chaos: An Introduction to Dynamical Systems. New York, Springer-Verlag, 1996, 603 s.
6. Grassberger, P., Procaccia, I.: Measuring the strangeness of strange attractors, Physica D 9, 1983, s. 189-208.
7. Osborne, A.R., Provenzale, A.: Finite correlation dimension for stochastic systems with power-law spectra, Physica D 35, 1989, s. 357-381.
8. Schreiber, T., Kaplan, D. T.: Nonlinear noise reduction for electrocardiograms. Chaos, 6, 1996, s. 87-92.
9. Richter, M., Schreiber, T.: Phase space embedding of electrocardiograms. Phys. Rev. E, 58, 1998, s. 6392-6398.
10. Richter, M., Schreiber, T., Kaplan, D. T.: Fetal ECG extraction with nonlinear state-space projections. IEEE Trans. Bio-Med. Eng., 45, 1998, s. 133-137.