

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK

Sztochasztikus rezonanciával elérhető jeljavítás és neurokardiológiai fluktuációk vizsgálata

Doktori értekezés tézisei

Készítette:
Makra Péter

Témavezető:
Dr Gingl Zoltán
egyetemi docens

SZEGED
2006

Bevezető

A véletlen jelekről, zajokról alkotott fölfogásunk jelentős változáson ment keresztül az elmúlt században. Míg korábban a zajokat kizárólag a mérés pontosságát korlátozó, információszerezést gátló tényezőknek tekintették, az utóbbi évtizedekben egyre inkább előtérbe került egyrészt az információforrásként való fölhasználásuk, másrészt bizonyos rendszerekben a rendszer optimális működését elősegítő, konstruktív szerepük is. Az előbbire az atomreaktorok működésének neutronfluxus-ingadozások alapján való megfigyelését, vagy az integrált áramkörök megbízhatóságának elektromos zajuk mérése útján történő ellenőrzését hozhatjuk példának, míg a konstruktív szerep a *sztochasztikus rezonancia* jelenségében ölt testet. Utóbbi azon folyamatok összefoglaló elnevezése, melyekben egy rendszerben jelen lévő vagy oda bevitt zaj a rendszer működését valamilyen értelemben optimalizálja – ezen optimalizáció leggyakrabban a rendszer kimenetén mért jel-zaj viszonyban tükröződik. A zajok konstruktív szerepben, illetve információforrásként való fölhasználását tükrözi dolgozatom fölépítése is: először a sztochasztikus rezonanciával kapcsolatos munkámat, majd azon orvosi kutatási együttműködéseink eredményeit mutatom be, amelyekben az emberi keringés és légzés fluktuációinak vizsgálata a keringési szabályozás jobb megértéséhez járulhat hozzá.

A sztochasztikus rezonancia a jel-zaj viszonyra mint optimalizálási mérőszámra vonatkoztatva annyit jelent, hogy a kimeneti jel-zaj viszony nagyobb bizonyos mennyiségű zaj jelenlétében, mint zaj nélkül. Fölvetődhet azonban az a kérdés is, hogy a zaj képes-e azt is lehetővé tenni, hogy a kimeneti jel-zaj viszony a bemenetnél nagyobb legyen, azaz lehetséges-e sztochasztikus rezonancia általi jel-zaj viszony erősítés. Dolgozatomban megmutatom, hogy a sztochasztikus rezonancia alapmodelljének tekintett kettős potenciálvölgyben ez lehetséges, ha a determinisztikus bemenőjel nem szinuszos, hanem impulzusszerű. A célból, hogy eldönthessük, vajon a rendszer dinamikájából következő véges válaszütem okozza-e a jel-zaj viszony erősítés fölléptét, megvizsgálom, hogy a sztochasztikus rezonancia általi jeljavítás jellege föllép-e egy nemdinamikai rendszerben, a Schmitt-triggerben is. Mind a kettős potenciálvölgy, mind a Schmitt-trigger esetén föltérképezem az elérhető jel-zaj viszony erősítés értékének függését a bemenőjel paramétereitől: a kitöltési tényezőtől és az amplitúdótól. Abból a tényből kiindulva, hogy egyes rendszerekben a színes zajoknak bizonyos sztochasztikus rezonanciát optimalizáló hatását mutatták ki, két nemdinamikai rendszerben megvizsgálom a színes zajú gerjesztés hatását a jel-zaj viszony erősítés értékére, és ezzel kapcsolatban is kitérek a jel-zaj viszony keskeny- és szélessávú definíciója közti különbségre, valamint elemzem az előbbi definíció esetén, színes zajoknál jelentkező jel-zaj viszony erősítésbeli maximum lehetséges okait.

Dolgozatom második részében két olyan orvosi témájú kutatást mutatok be, amelyekben a zajok (konkrétan az emberi szívritmus, vérnyomás és a légzés fluktuációi) az információforrás szerepét töltik be. Az elsőben a vérvesztés hatásait vizsgáltuk az emberi keringés szabályozására; itt a légzési frekvencia elemzése volt a feladat. A második kísérletben, amelyhez a szívritmus-fluktuációk időtartománybeli paramétereit számítottam ki és Poincaré-grafikonokat készítettem, a dohányzás keringési paraméterekre kifejtett hatását elemeztük.

Vizsgálati módszerek és eszközök

A kettős potenciálvölgybeli sztochasztikus rezonancia során föllépő jel-zaj viszony erősítést analóg céláramkörrel megvalósított szimulációval tanulmányoztam. A Schmitt-trigger és a színes zajok jel-zaj viszony erősítésre gyakorolt hatását numerikus szimulációval vizsgáltam. Mind az analóg szimuláció adatainak földolgozására, mind a numerikus szimulációk elvégzésére a *LabVIEW 6i* grafikus programozási környezetet használtam. Az utóbbi szolgált az orvosi kutatásokhoz elvégzett számítások háttéréül is.

Új tudományos eredmények

1. Kutatócsoportunk elsőként mutatott ki sztochasztikus rezonancia által kiváltott jel-zaj viszony erősítést a kettős potenciálvölgyben, rációfolva a korábbi eredményekre, amelyek ezt igen valószínűtlennek jósolták. Analóg szimulációk segítségével föltérképeztem, hogyan függ az erősítés az impulzusszerű bemenőjel amplitúdójától és kitöltési tényezőjétől. Megerősítettem, hogy a sztochasztikus rezonancia általi jeljavítás jelensége a nemlineáris átviteli tartományban dominál, és az erősítés az amplitúdó növelésével nő. Megmutattam, hogy az erősítés nagyobb kisebb kitöltési tényezőjű (kisebb impulzusszélességű) jelekre, ami magyarázatot adhat arra is, miért nem vezettek eredményre a szinuszos gerjesztéssel végzett korábbi vizsgálatok. Egyszerű fenomenológiai magyarázatot adtam az erősítés mechanizmusára [T1].
2. Numerikus szimulációk segítségével összevetettem a Schmitt-triggerbeli jel-zaj viszony erősítés jellemzőit a kettős potenciálvölgyben tapasztaltakkal. Megmutattam, hogy ebben a nemdinamikai rendszerben nagyobb erősítés érhető el, mint a kettős potenciálvölgyben, és ezen erősítés értéke kevésbé függ a bemenő amplitúdótól. A vizsgálatokból mindazonáltal kitűnt, hogy a Schmitt-triggerben a sztochasztikus rezonanciával elért jeljavítás mechanizmusa nagymértékben hasonló a kettős potenciálvölgybelihez, ami arra enged következtetni, hogy a jeljavításért nem a rendszer dinamikája a felelős [T2].
3. Több oldalról bizonyítottam, hogy indokolt a sztochasztikus rezonancia vizsgálatok a hagyományos jel-zaj viszonynál gyakorlatiasabb szélessávú jel-zaj viszonyt használni. A jel-zaj viszony elektronikai gyakorlatban szinte kizárólagosan használt értelmezése egyszerű demonstrációval igazolhatóan sokkal valóságghűbben tükrözi a jel zajtartalmát, mint a sztochasztikus rezonancia irodalmában elterjedt definíció, ugyanakkor a kettős potenciálvölgyben például szélesebb paramétertartomány esetén ad jel-zaj viszony erősítést, és nem hajlamos arra, hogy színes zajú gerjesztések esetén kétes valóság tartalmú optimalizációt sugalljon [T1, T3].
4. Numerikus szimulációk útján föltérképeztem egy aszimmetrikus szintmetszésdetektorban és a Schmitt-triggerben a sztochasztikus rezonanciával elérhető jel-zaj viszony erősítés függését a sztochasztikus gerjesztésként alkalmazott $1/f^\kappa$ típusú színes zajok κ spektrális paraméterétől. Megállapítottam, hogy a szélessávú jel-zaj viszony alapján számolt erősítés, az egyes neuronmodellekben talált eredményekkel ellentétben, itt nem mutat semmiféle optimalizációt a spektrális kitevő függvényében: a κ növelésével az erősítés elérhető maximuma csökken, a maximum elérésé-

hez szükséges zajszórás pedig növekszik. Ugyanakkor a sztochasztikus rezonancia irodalmában elterjedt keskenysávú jel-zaj viszony alapján számolt erősítés viselkedésében határozott nemmonotonitás figyelhető meg: nemzérő spektrális kitevőjű zaj esetében az erősítésnek igen erőteljes maximuma van. Megmutattam, hogy ez a viselkedés nem annyira valós optimalizáció, mint inkább a keskenysávú definíció sajátossága, amely nagymértékben függ a jel és a zaj frekvenciaviszonyaitól [T3].

5. A vérvétel során bekövetkező vérvesztésre adott vegetatív idegrendszeri válaszok vizsgálatához elvégzett frekvenciatartománybeli analízissel kimutattam, hogy a vizsgálati alanyok légzési frekvenciája nem változik szignifikánsan a vérvétel után. Ennek a ténynek a jelentősége abban rejlik, hogy a vizsgálat ugyanekkor a vérnyomás-spektrum légzéssel összefüggő, nagyfrekvenciás tartományában a teljesítmény szignifikáns növekedését mutatta ki, és a szívritmus és a vérnyomás légzéssel való összefüggése miatt a vérnyomást szabályozó vegetatív mechanizmusok föltérképezéséhez szükséges ismerni, hogy a légzési frekvencia változott-e közben [T4].
6. A dohányzásnak a szív- és érrendszeri vegetatív szabályzásra való hatását föltáró vizsgálatban RR-paraméterek kiszámításával és a Poincaré-grafikonok elkészítésével segítetttem annak kimutatását, hogy egyetlen cigaretta elszívása is szignifikánsan megváltoztatja a vérnyomás- és pulzusszám-variabilitás időtartománybeli paramétereit: miközben a vérnyomás emelkedik, az RR-intervallumok átlaga és szórása, továbbá az egymást követő intervallumok különbségének effektív értéke (rmsSD), és az 50 ms-nál jobban eltérő szomszédos intervallumok arányszáma (pNN50) jelentősen csökken. Jelentősen csökken továbbá a vérnyomás szívritmusra gyakorolt hatásának erősségét jellemző baroreflexérzékenységi paraméterek értéke is. A vizsgálat alapján a korábban krónikus dohányosokon megfigyelt kedvezőtlen hatások a nemdohányzókra, a passzív dohányosokra is kiterjeszthetők [T5].

Az értekezés alapjául szolgáló közlemények

- [T1] GINGL Z – MAKRA P – VAJTAI R: High signal-to-noise ratio gain by stochastic resonance in a double well. *Fluctuation and Noise Letters*, vol 1 (2001) L181–L188. p.
- [T2] MAKRA P – GINGL Z – KISH, L B: Signal-to-noise ratio gain in non-dynamical and dynamical stochastic resonators. *Fluctuation and Noise Letters*, vol 2 (2002) L147–L155. p.
- [T3] MAKRA P – GINGL Z – FÜLEI T: Signal-to-noise ratio gain in stochastic resonators driven by coloured noises. *Physics Letters A*, vol 317 (2003) 228–232. p.
- [T4] ZÖLLEI É – PAPIKA D – MAKRA P – GINGL Z – VEZENDI K – RUDAS L: Human autonomic responses to blood donation. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, vol 110 (2004) 114–120. p.
- [T5] HALMAI L – RUDAS M – MAKRA P – GINGL Z – RUDAS L: A dohányzás azonnali hatása a kardiovaszkuláris autonóm regulációra. *Cardiologia Hungarica*, vol 33 (2003) 110–116. p.

Egyéb közlemények, konferenciaelőadások

- [1] GINGL Z – MAKRA P – FÜLEI T – VAJTAI R – MINGESZ R: Colored noise driven stochastic resonance in a double well and in a FitzHugh-Nagumo neuronal model. *16th International Conference on Noise in Physical Systems and 1/f fluctuations (ICNF)*. Gainesville, USA, 2001. október 22–25. In BOSMAN, G (ED): *Proceedings of the 16th International Conference on Noise in Physical Systems and 1/f fluctuations*. 2001, World Scientific, 420–423. p.
- [2] GINGL Z – VAJTAI R – MAKRA P: High signal-to-noise ratio gain by stochastic resonance in a double well. *16th International Conference on Noise in Physical Systems and 1/f fluctuations (ICNF)*. Gainesville, USA, 2001. október 22–25. In BOSMAN, G (ED): *Proceedings of the 16th International Conference on Noise in Physical Systems and 1/f fluctuations*. 2001, World Scientific, 545–548. p.
- [3] GINGL Z – MAKRA P: A dynamical system exhibits high signal-to-noise ratio gain by stochastic resonance. *Third International Conference on Unsolved Problems of Noise and Fluctuation in Physics, Biology and High Technology (UPoN)*. Washington DC, USA, 2002. szeptember 2–6. In BEZRUKOV, S M (ED): *Proceedings of the Third International Conference on Unsolved Problems of Noise and Fluctuations in Physics, Biology and High Technology (AIP Conference Proceedings 665)*. Melville, 2003, American Institute of Physics, 100–108. p.
- [4] GINGL Z – MINGESZ R – MAKRA P: On the amplitude and time-structure properties of $1/f^\alpha$ noises. *Third International Conference on Unsolved Problems of Noise and Fluctuation in Physics, Biology and High Technology (UPoN)*. Washington DC, USA, 2002. szeptember 2–6. In BEZRUKOV, S M (ED): *Proceedings of the Third International Conference on Unsolved Problems of Noise and Fluctuations in Physics, Biology and High Technology (AIP Conference Proceedings 665)*. Melville, 2003, American Institute of Physics, 578–583. p.
- [5] RUDAS L – PAPIKA D – ZÖLLEI É – MAKRA P – GINGL Z: Autonomic responses to blood donation. *Blood Pressure and Heart Rate Variability: New Technologies – Drug Effects, Hungarian Satellite Symposium to Hypertension* (Prague). Budapest, 2002. június 28.
- [6] GINGL Z – MAKRA P – GÁSPÁR M – ZÖLLEI É – PAPIKA D – RUDAS L: About the frequency-domain analysis of unevenly sampled heart rate and blood pressure signals. *Blood Pressure and Heart Rate Variability: New Technologies – Drug Effects, Hungarian Satellite Symposium to Hypertension* (Prague). Budapest, 2002. június 28.
- [7] FÜLEI T – GINGL Z – MAKRA P: Mechanism of signal-to-noise ratio gain in a monostable threshold stochastic resonator. *Fluctuations and Noise*. Santa Fe, USA, 2003. június 1–4. In SCHIMANSKY-GEIER, L & al (EDS): *Noise in Complex Systems and Stochastic Dynamics (Proceedings of SPIE Vol 5114)*. Bellingham, 2003, SPIE, 327-334. p.
- [8] MAKRA P – FÜLEI T – GINGL Z: Possibilities of signal-to-noise ratio gain in stochastic resonators driven by coloured noises. *17th International Conference on Noise and Fluctuations*. Prága, Csehország, 2003. augusztus 18–22. In SIKULA, J (ED): *Proceedings of the 17th International Conference on Noise and Fluctuations*. Brno, 2003, CN-RL, 85–88. p.

- [9] MINGESZ R – GINGL Z – MAKRA P: Level-crossing time statistics of Gaussian $1/f^\alpha$ noises. *17th International Conference on Noise and Fluctuations*. Prága, Csehország, 2003. augusztus 18–22. In SIKULA, J (ED): *Proceedings of the 17th International Conference on Noise and Fluctuations*. Brno, 2003, CNRL, 505–508. p.
- [10] MAKRA P – GINGL Z – FÜLEI T: Signal-to-noise ratio gain in stochastic resonators driven by coloured noises. *Fluctuations and Noise 2004*. Maspalomas, Kanári-szigetek, Spanyolország, 2004. május 26–28. In GINGL Z &al (EDS): *Noise in Complex Systems and Stochastic Dynamics II (Proceedings of SPIE Vol 5471)*. Bellingham, 2004, SPIE, 213–221. p.
- [11] MINGESZ R – BARA P – GINGL Z – MAKRA P: Digital Signal Processor (DSP) based $1/f^\alpha$ noise generator. *Fluctuations and Noise 2004*. Maspalomas, Kanári-szigetek, Spanyolország, 2004. május 26–28. In WHITE, L B (ED): *Noise in Communication (Proceedings of SPIE Vol 5473)*. Bellingham, 2004, SPIE, 213–221. p.
- [12] MINGESZ R – BARA P – GINGL Z – MAKRA P: Digital Signal Processor (DSP) based $1/f^\alpha$ noise generator. *Fluctuations and Noise Letters*, vol 4 (2004) L605–L616. p.
- [13] MAKRA P – GINGL Z – MINGESZ R: Signal-to-noise ratio gain by stochastic resonance and its possible applications. *International Workshop on Stochastic Resonance: New Horizons in Physics and Engineering*. Drezda, Németország, 2004. október 4–7.
- [14] MINGESZ R – MAKRA P – GINGL Z: Cross-spectral analysis of signal improvement by stochastic resonance in bistable systems. *Fluctuations and Noise 2005*. Austin, Texas, USA, 2005. május 24–26. In KISH, L B – LINDENBERG, K – GINGL Z (EDS): *Noise in Complex Systems and Stochastic Dynamics III (Proceedings of SPIE Vol 5845)*. Bellingham, 2005, SPIE, 283–292. p.
- [15] GINGL Z – RUDAS L – MAKRA P: Signal processing problems of neurocardiological fluctuations. *4th International Conference on Unsolved Problems of Noise and Fluctuations*. Gallipoli (Lecce), Olaszország, 2005. június 6–10. In REGGIANI, L &al (EDS): *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsolved Problems of Noise and Fluctuations in Physics, Biology and High Technology (AIP Conference Proceedings 800)*. Melville, 2005, American Institute of Physics, 293–298. p.
- [16] MINGESZ R – GINGL Z – MAKRA P: Marked signal improvement by stochastic resonance for aperiodic signals in the double-well system. *News, Expectations and Trends in Statistical Physics, NEXT-SigmaPhi 3rd International Conference*. Kolymbari, Kréta, Görögország, 2005. augusztus 13–18.
- [17] MINGESZ R – GINGL Z – MAKRA P: Marked signal improvement by stochastic resonance for aperiodic signals in the double-well system. *European Physical Journal B*, vol 50 (2006) 339–344. p.