

Válasz Dr. Beleznay Ferenc professzor úr bírálatára

Köszönöm szépen, hogy professzor úr vállalta és elkészítette a disszertációmban foglalt tudományos munkám alapos vizsgálatát, bírálatát!

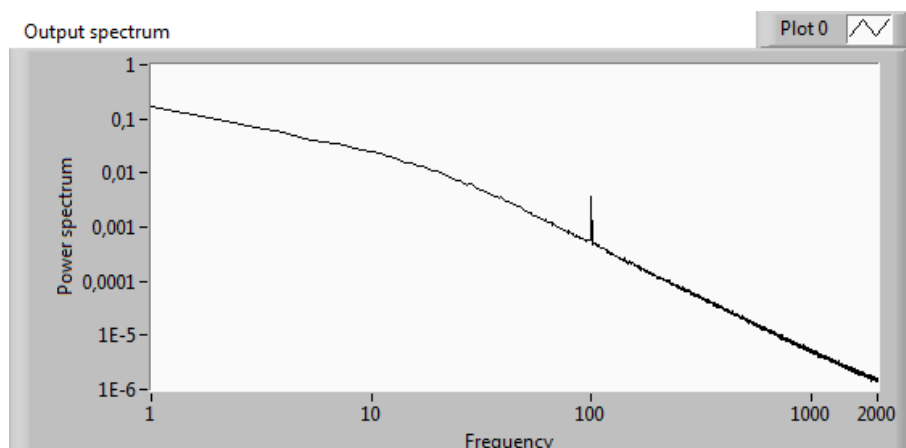
A bíráló bevezető megjegyzésével egyetértek, a fejezetek valóban lazábban, a zajok konstruktív szerepének felhasználása útján kapcsolódnak egymáshoz. Professzor úr így külön az alfejezetek értékelését végzi el, kérdéseit is ezeknél teszi fel, melyekre a következőkben válaszolok.

Nagyon megtisztelő számomra, hogy professzor úr több helyen is említi, hogy sajnálja, hogy a kutatómunka megállását látja bizonyos témák esetén – ebből is látszik, hogy értékes és érdekes területnek tartja ezeket. Igyekszem külön kitérni ezekre a felvetésekre is.

1. tézispont

Bírálóm ennél a pontnál kérdezi, hogy „*nem várható-e ez az eredmény, hiszen ha egy olyan transzformációt alkalmazunk egy zajforrásra, amely „viszonylag lassan” módosítja az eredeti jelet a jel spektrális energia eloszlása alig fog változni. Ezt látszik igazolni, hogy az 1.8. ábrán a harmonikus jellel módosított zajteljesítmény spektrális eloszlása feltűnően vált az alkalmazott harmonikus frekvenciánál.*”

Azt gondolom, hogy bár az érvelés kvalitatív megközelítésként segíthet, nem várható egyértelműen ez az eredmény. Az erősen nemlineáris transzformáció miatt a jelben éles törések jelennek meg, amik megemelik a nagyfrekvenciás komponenseket. A furcsa az, hogy ez épp olyan arányban történik, hogy a spektrum változatlan marad. A fenti érvelés biztosan nem tud arra magyarázatot adni, miért pont az $1/f$ zaj a határeset, aminél erősebb korreláció esetén nem invariáns a spektrum, mi gyengébb esetén igen. A disszertáció 1.8 ábrája sajnos kicsit megtévesztő, valóban a csúcs környékén van a töréspont. Ezek viszont egymástól függetlenek, a töréspont helye a zajamplitúdónak és a hiszterézis küszöbszintjének arányától függ. Szimulációt futattam ennek illusztrálására, az alábbi ábra mutatja, hogy fele akkora bemenő zajnál, azonos küszöbérték mellett a töréspont jóval lejjebb kerül, míg a csúcs helye változatlan marad.



A valós idejű szimulációhoz egy LabVIEW programot készítettem, amit itt lehet elérni: <http://www.inf.u-szeged.hu/~gingl/mtadoc/sr1f.llb>

Professzor úr tesz egy megjegyzést is: „*szomorúan láttam, hogy mind az irodalmi hivatkozások, mind a saját munka látszólag megállt 2000 elején* – gondolom ez azt jelenti,

hogy a jelölt ezzel a problémával az utóbbi években nem foglalkozik. Kérem erősítse meg, ha így enne.”

Releváns további feladatokat adtam akkori PhD hallgatómnak, Mingesz Róbertnek, aki a szintmetszések közötti időtartamok statisztikáját és korrelációs tulajdonságait vizsgálta és érdekes eredményeket ért el (Tézisfüzete megtalálható a doktori.hu oldalon: <http://doktori.bibl.u-szeged.hu/1552/2/MingeszRobert-Tezispontok.pdf>, a releváns tézispontok: 2,3,4). Japán társszerzőim is folytatták még a munkát, 2007-ig megjelentettek néhány publikációt, de kutatócsoportom valóban nem foglalkozott már tovább a témával. Ennek oka főleg az, hogy nem nagyon láttam jelentős továbblépési lehetőséget, míg más munkákra sok energiát és időt kellett szánnom.

Fontos újabb lendületet adhatna, ha konkrét alkalmazási területeket találnának kutatók, az eredmény hatékonyabb terjesztése is segíthetne. Gondolkozni fogok a lehetőségeken, pár újabb elképzelésem van is, amiket éppen bírálóim felvetéseinek köszönhetek.

2. tézispont

A bíráló kérdéseire adott válaszaim a következők.

„az elektronikus eszközök nagy része olyan (nagyon) vékony rétegeket hasznosít, amelyekben a meghibásodást például a réteg egy pontján és nem a réteg síkjában történő folyamatok okozhatják. Lehet-e ilyen esetekben is az egyszerű modellt használni?”

Igen, tulajdonképpen a folyamat általában egy pontból indul ki, és az időbeli fejlődés során alakul ki a speciális degradációs mintázat. A kifejlesztett Monte Carlo szimulációs környezet rendkívül rugalmas, szinte tetszőleges fizikai törvény implementálható az egyes elemek viselkedésének megadására (ilyen a szabad és irányított perkoláció, de lehetne sok más is). Az elemi ellenállásokhoz tartozó mennyiségek (áram, feszültség, hőmérséklet, zaj, stb) rugalmas kezelése is megoldott. Szeretném ezt azzal is megerősíteni, hogy terjedelmi okoknál fogva nem került a disszertációba pár más sikeres modellezésem, melyet az Eindhoveni Műszaki Egyetemmel folyt együttműködésben végeztem [2.1] ugyanerre a modulra építve. A grafikus felülettel kiegészített futtatható program készült ebben a munkában, alkalmassá tettem 10 különböző szimuláció elvégzésére is [2.2]. Emellett olasz társszerzőim ennek a szoftvermodulnak a felhasználásával további tudományos eredményeket értek el (közel 30 publikáció).

„Külön gond lehet, hogy ma már az elektronikus eszközök döntő része nem lineáris, hanem digitális áramkör. Ezeknél a „meghibásodás”, - eltekintve a paraméterek esetleges fokozatos változásától, amit normális működés során észre sem veszünk, - értelemszerűen „ugrás-szerű”. Lehet-e ilyen esetekben a modellt, vagy hasonló szellemű megfontolást alkalmazni?”

Kétségtelen, hogy a működés közbeni mérés nem egyszerű feladat, főleg digitális áramkörökben, ahol ráadásul igen nagyszámú elem található. Megoldás azért elképzelhető, mert kritikusabb részek próbaszerű monitorozása elegendő lehet, ráadásul multiplexerekkel rövidebb időkre kiiktathatók lehetnek részek a vizsgálat időosztásos megoldására. Eredményeinket én elsősorban alapkutatási jellegűnek tartom, a technikai megoldások akkor kerülhetnek előtérbe, ha a módszer elég hatékonynak és kivitelezhetőnek bizonyul.

„Itt is a saját és a referált dolgozatok lényegében a 90-es évekkel véget érnek! Bár az elektronikában ez nagyjából összeesik a digitális „áttérés” idejével, számos olyan, a vékony-réteg ellenállások jelentőségét lényegesen meghaladó terület van, amelyekben a funkcionális vékony-rétegek a működés alapjai – ilyenek például a vékony-réteg-, szerves-napelemek, üzemanyag cellák, Li-ion elemek... hogy csak a legfontosabbakat említsük. Mi a jelölt

véleménye, érdemes lenne-e a meglévő szakmai tudásukkal, esetleg fiatalok bevonásával ezeken a területeken újra bekapcsolódni?”

Az előző pontoknál már utaltam rá, hogy maga a modellezési módszer igen sok feladat elvégzésére alkalmas, társszerzőim cikkei egészen 2009-ig terjednek, melyek ebből fejlődtek ki [2.3-2.7]. A felvetett kérdésre azt tudom válaszolni, hogy a fluktuációkkal javított érzékelés esetében tervezünk olyan modellezéseket, melyek alapja ugyanez a modul lesz és erre valóban az egyik PhD hallgatóm bevonásával készülünk. Nagyon köszönöm professzor úrnak a biztatást jelentő megjegyzését és kérdését!

- [2.1] Vandamme LKJ, Sodini D, Gingl Z, *Solid-State Electronics* 42:(6) pp. 901-905. (1998), [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1101\(98\)00105-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1101(98)00105-1)
- [2.2] <http://www.inf.u-szeged.hu/~gingl/achievements/biasperc/>
- [2.3] Pennetta, C., L. B. Kiss, Z. Gingl, and L. Reggiani. "A noise temperature analysis of the electrical degradation of thin nanostructured films." *Journal of Nanoparticle Research* 2, no. 1 (2000): 97-101. <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1010046427225>
- [2.4] Pennetta, C., E. Alfinito, L. Reggiani, and S. Ruffo. "Non-Gaussian resistance noise near electrical breakdown in granular materials." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 340, no. 1 (2004): 380-387. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2004.04.030>
- [2.5] Pennetta, C., E. Alfinito, L. Reggiani, and S. Ruffo. "Non-Gaussianity of resistance fluctuations near electrical breakdown." *Semiconductor science and technology* 19, no. 4 (2004): S164. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/19/4/057>
- [2.6] Pennetta, C., E. Alfinito, L. Reggiani, F. Fantini, I. DeMunari, and A. Scorzoni. "Biased resistor network model for electromigration failure and related phenomena in metallic lines." *Physical Review B* 70, no. 17 (2004): 174305. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.70.174305>
- [2.7] Pennetta, C., E. Alfinito, and L. Reggiani. "Tuning the correlation decay in the resistance fluctuations of multi-species networks." *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2009, no. 02 (2009): P02053. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-5468/2009/02/P02053>

3. tézispont

A bíráló nem javasolja külön tézispontként ezt a pontot, én is gondolkoztam azon, szerepeltessem-e. Mivel több publikációt tudtam közvetlenül a kísérleti berendezéshez kötni, úgy gondoltam, hogy ez alátámasztja tudományos jellegét és értékét, különbségét akár a forgalomban levő univerzális műszerekhez, akár a gyakorlati célú műszerfejlesztésekhez képest. Számos magas presztízsű műszaki folyóiratban (IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, Review of Scientific Instruments, IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, IEEE Transactions on Biomedical Engineering) olvastam cikkeket műszer- és eszközfejlesztésekről, ez is megerősített abban, hogy külön tézispontot szenteljek ennek a fejlesztésnek, aminek sok tudományos eredményt és kutatási együttműködést is köszönhetek. Szeretném azt is megemlíteni, hogy a műszer egy-egy verzióját 2000-ben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem munkatársai által szervezett nemzetközi konferencián [3.1], 2002-ben pedig a nemzetközi Hungelekro szimpózium felkért előadóként is bemutattam [3.2].

A bírálóm kérdése ezzel a ponttal kapcsolatban: „Gondolt-e arra, hogy az említett folyamatos (tovább-) fejlesztés során az újabban használatos (át-)programozható logikai

céláramköröket (FPGA) és az egyre általánosabb és rendkívül olcsó USB alapú adatgyűjtő kártyákat is alkalmazzanak?”

Az FPGA áramkörök használatára a jóval bonyolultabb programozási technikájuk miatt nem gondoltam, nagy sebességre nem volt szükségem. A DSP processzorok megfelelő sebességet adtak minden fontos valós idejű szimulációkhoz, egyszerű nyelven (algebraic assembly, C, C++) programozhatók. A lényeg éppen abban rejlett, hogy az új kód egyszerűen letölthető a műszerbe, onnantól kezdve a szoftver döntötte el, milyen célt is szolgál a berendezés: lehetett akár zajgenerátor, sztochasztikus rezonanciát megvalósító rendszer, de biztonságos kommunikációt megvalósító eszköz is. A disszertáció 3. fejezetének második paragrafusában és egy kapcsolódó közleményben [3.2] is felsorolok számos további alkalmazást, melyeket tudományos publikációk is alátámasztanak.

Ma már használunk USB alapú és akár FPGA áramköröket is tartalmazó gyári eszközöket, főleg a National Instruments cég termékeiről van szó [3.3-3.6]. Ugyanakkor a leghatékonyabb kísérletezés kivitelezéséhez szinte mindig korlátokba ütközünk, gyakran van olyan követelmény, ami szükséges a kísérleteinkhez, de az eszköz nem biztosítja. Megjegyzem, hogy azért az említett gyári eszközök eleve nem túl olcsók, 1 millió Ft feletti árú rendszer [3.4-3.6] tud hasonló rugalmasságot, mint a tézispontban szereplő berendezés, aminek ára ennek töredéke. Hangsúlyoznám azért, hogy az ár nem volt szempont, hiszen nem piacképes, hanem tudományos célú berendezést szerettem volna kifejleszteni.

Kutatócsoportom az egyedi eszközök fejlesztését a mai szoftver-definiált műszerválaszték mellett sem adta fel, de ma már mi is sokkal kompaktabb, általában USB portos berendezéseket tervezünk, melyek igen hatékonyak és a prototípusaik akár sorozatgyártáshoz is felhasználhatók. Erre példa egy rendkívül kompakt fluorométer [3.7] és egy univerzális szenzorinterfész is [3.8], melyeket megemlítettem a tézispontok utáni összefoglalóban is. Mindkettő fejlesztést impact faktoros publikáció ismerteti.

Az önállóan és kutatócsoportom által végzett műszerfejlesztésekről részletes információ található a honlapomon (<http://www.inf.u-szeged.hu/~gingl/achievements/>) és a kutatócsoportom honlapján (<http://www.noise.inf.u-szeged.hu/Instruments/?lang=en>).

- [3.1] *Gingl Zoltán, Kántor Zoltán, Intelligent General Purpose Data Acquisition Units For Student Labs, In: Pacher Pál, Pipek János (eds.), Proceedings of the Second European Conference on Physics Teaching In Engineering Education (PTEE 2000).*, Budapest, Hungary, 2000.06.14-2000.06.17., Budapest University of Technology and Economics, pp. P23/1-P23/5., <http://www.inf.u-szeged.hu/~gingl/Publications/C30.pdf>
- [3.2] *Gingl Zoltán, Kántor Zoltán, Mingesz Róbert, A DAS1414 általános célú intelligens adatgyűjtő és vezérlő egység és alkalmazásai, HUNGELEKTRO 2002, 7th International Exhibition and Conference on Electronics Technology, Budapest, 23 April 2002 (2002),* <http://www.muszeroldal.hu/measurenotes/gingl.pdf>
- [3.3] *NI USB-6211, 16-Bit, 250 kS/s M Series Multifunction DAQ,* <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/hu/nid/203224>
- [3.4] *NI cRIO-9076 Integrated 400 MHz Real-Time Controller and LX45 FPGA,* <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/hu/nid/209758>
- [3.5] *NI 9223 4-Channel, 1 MS/s, 16-Bit Simultaneous Analog Input Module,* <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/hu/nid/209139>
- [3.6] *NI 9263 4-Channel, 100 kS/s, 16-bit, ± 10 V, Analog Output Module,* <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/hu/nid/208806>

- [3.7] P. Kocsis, E. Asztalos, Z. Gingl, P. Maróti, *Kinetic bacteriochlorophyll fluorometer, Photosynthesis Research*, July 2010, Volume 105, Issue 1, pp 73-82 ,
<http://dx.doi.org/10.1007/s11120-010-9556-6>
- [3.8] Gingl Z, *Fabricate a high-resolution sensor-to-USB interface, EDN* 56:(22) pp. 54-57. (2011), http://www.inf.u-szeged.hu/~gingl/Publications/2011_EDN_56_20_54.pdf

4. tézispont

A professzor úr szerint tisztázandó alpontok közös kutatást jelentenek. Az alábbiakban pontosítást adok a kérdésnek megfelelően.

4.1. Az elsőként elért jel/zaj viszony erősítés [4.1] esetén nem a sztochasztikus rezonancia területén szokásos definíciót használta a szerző (hiszen a jel nem is volt periodikus), hanem egy keresztspektrumokra épülő definíciót. Sokan ennek tulajdonították, hogy 1-nél nagyobb erősítés kihozható, szkeptikusok voltak, hogy a szokásos definícióval is kapható lenne jelentős erősítés. Az volt az ötletem ezért, hogy használjunk periodikus impulzussorozatot és a szokásos jel/zaj viszony definíciót. A numerikus szimulációs vizsgálatokat végezte el a PhD hallgató az útmutatásaimnak megfelelően. Sajnos a munkát később nem folytatta, disszertációját sem készítette el, külföldre távozott.

4.5 A disszertáció 4.6.1 fejezetében vezettem be, miért merült fel a színes zajok vizsgálta a sztochasztikus rezonancia területén. A dolgozat 4. fejezetéhez tartozó három publikációt olvastam [4.2,4.3,4.4], melyekben az $1/f$ zajnak kitüntetett szerepét vetik fel a Fitzhugh-Nagumo neuronmodell esetén. Ez motivált arra, hogy megvizsgáltsam ennél a modellnél jóval alaposabban a zajkitevő szerepét, és kiterjesszem a vizsgálatok körét a más fontos sztochasztikus rezonanciát mutató rendszerekre is (szintmetszés-detektor és Schmitt-trigger). Az ezzel kapcsolatos numerikus szimulációs munkákat végezte el PhD hallgatóm. Tézisfüzete megtalálható itt: <http://doktori.bibl.u-szeged.hu/495/>, a releváns tézispont a 4.

4.6 Javasoltam, hogy nem-periodikus és véletlenszerű bemenő jelek esetére is vizsgáljuk meg a kettős potenciálvölgy alapú dinamikai rendszer esetén a jel/zaj viszony növelési lehetőségeket, mert úgy gondoltam, hogy eséllyel kapható erősítés. Az általam felépített kísérletező és mérőrendszer azonos azzal, amit 4.3 tézispontban is említettem. Mingesz Róbert akkori PhD hallgatóm végezte el a szisztematikus méréseket és vizsgálatokat, emellett numerikus szimulációkat is végzett. Tézisfüzete megtalálható a doktori.hu oldalon: <http://doktori.bibl.u-szeged.hu/1552/2/MingeszRobert-Tezispontok.pdf>, a releváns tézispont az 5.

Professzor úr több kérdést is feltett a tézisponttal kapcsolatban, ezekre válaszolok a következőkben.

„Nem szokás így fogalmazni, de igaz-e, hogy pl. a diffúzió is a termikus mozgás (zaj?) és a potenciális energia „minimumai” közötti átugrás eredménye? Ha így lenne, hasznosítható-e ez az analógia a stochasztikus rezonancia körében?”

Professzor úr kimondottan érdekes dolgot vet fel! Gázokban és folyadékokban kicsit máshogy zajlik a diffúzió, de szilárd testekben illetve felületükön lehet potenciálmínimumok között mozgó részecskéről beszélni, ahol a gerjesztő zaj szerepét hőmérséklet veheti át. Külső periodikus (vagy akár más determinisztikus) gerjesztést lehet adni töltéssel rendelkező részecskének külső feszültség rákapcsolásával. A részecskék mozgásában (áramban) a determinisztikus és termikus zajáram hatása is megjelenik. Ebben az esetben valóban sztochasztikus rezonancia léphet fel, ha a periodikus jel olyan kicsi, hogy önmagában nem indítana meg áramot. A hőmérséklet növelése ezt segítheti, túl nagy hőmérséklet viszont túl zajossá teszi az áramot. Foglalkoznak is publikációk a diffúzió és sztochasztikus rezonancia

kapcsolatával [4.5,4.6]. Érdekes azért megjegyezni, hogy a sztochasztikus rezonancia tipikusan elég speciális követelményeket jelent, kevés eséllyel lehet itt szerepe.

„Az igen részletes vizsgálatok között hiányzik az „SNR gain” függése a kitöltési tényezőtől – azt várhatnánk, hogy ezt egyszerűbb volna leírni! Mi erről a jelölt véleménye?”

Vizsgáltuk a kitöltési tényező valóban fontos hatását több rendszer esetén is, ezt mutatja a disszertációban a 4.6, 4.9, 4.13, 4.14 ábra. Valóban szerencsés lett volna olyan ábrát is mutatnom, ahol a kitöltési tényező nem paraméterként jelenik meg, hanem az elérhető maximális erősítést adja meg a kitöltési tényező függvényében. Teljesen egyetértek, hogy ezt leírni is egyszerűbb. Megállapítottuk, hogy a kimeneti jel/zaj arány nem változik számottevően a kitöltési tényező függvényében, főleg a nem-dinamikai rendszerek esetében, míg a bemeneti jelnél a kitöltési tényezőtől függ egyszerűen megadható módon. Szintmetszési detektorok esetére meg is adtunk egy elméleti megközelítést az erősítés paramétereiktől való függésére [4.7].

„Ha jól értem, a lézer pulzusok esetében a trigger jel (környezettől, körülményektől... függő) időben lassan változó változását korrigálták az ismertett megoldással. Ha azonban lehetőség van az időben változó vizsgálandó jel „egyedi” mérésére, nem küszöbölhető-e ki eleve a késés ingadozása (így a megjósolhatatlan véletlen ingadozás is!), ha elegendően gyors jelfeldolgozásnál maga a lézer jel indítja a vizsgálatot? Lehet-e egyszerű példával megmutatni a választott megoldás előnyeit, mert konkrét mérést, ahol ezt bemutatná, a dolgozat sajnos nem tartalmazott.”

Professzor úr jól látja a módszer lényegét, csak a lassú komponens tudjuk kompenzálni, a késleltetés mérése eleve átlagolást igényel a pontosítás miatt. Ez egyben azt is jelenti, hogy az egyes impulzusok késésének mérése csak jóval pontatlanabban végezhető el, mint amekkora a késés bizonytalansága. Természetesen több vizsgálatnál elegendő lehet a lézerimpulzushoz szinkronizálni, gond akkor van, ha több berendezést – köztük a lézert is – egy jelhez kell igazítani. A triggerjelhez képest a lézerimpulzus véletlenszerűen késik minden egyes impulzus esetén. Az valóban lehetséges, hogy megmérjük ennek a késleltetésnek az idejét (bár ehhez nagyobb felbontás kellene, mint amit egyes impulzusok esetén a mi megoldásunk biztosít), de ekkor már a fényimpulzus megjelent, és egy mondjuk 1m-re levő céltárgy esetén mindössze 3ns-nyi idő állna rendelkezésre a beavatkozásra.

A megoldásunk előnyeit főleg az jelenti, hogy a lézerimpulzusok jitter zajának felhasználásával a mérési idő kvantálási küszöbénél nagyobb pontossággal megoldható a lassú késleltetési komponens kompenzálása, és ehhez akár egyetlen mikrovezérlő és külső komparátor elegendő. Ezt a dolgozatban szereplő 4.24, 4.32 és 4.33 ábrák illusztrálják. Az eredeti feladatunk a korábbi elektronikára (4.23 ábra, tervezője Almási Gábor, első kapcsolódó publikációnk [4.8] társszerzője) épülő valódi szabályzómodulok készítése volt, az elv a szimulációk alapján egyértelműen jól működött. Miután az elkészült modulokat valós körülmények között teszteltük, oszcilloszkóppal a szabályozást ellenőriztük, látszott, hogy a várakozásnak megfelelően működik. Ezt a tesztelést valóban nem dokumentáltuk, célja csak annyi volt, hogy ellenőrizzük a működést. Azóta számos lézerbe építettek be ilyen elven működő – bár még a régebbi elektronikára épülő – szabályzómodulokat. A disszertáció 68. oldalán levő összefoglalóban arra is rámutatok, hogy az új tervezésű berendezés és módszer sokkal szélesebb körben is felhasználható, amit sok esetben pusztán a beágyazott szoftver cseréjével is meg lehet valósítani.

„Ha jól értettem a stochasztikus rezonancia nemlineáris rendszerekben periodikus jelek detektálására szolgál zajos környezetben. Ugyanilyen „mérést” lock-in generálással is tudunk mérni. Kérdésem, van-e összehasonlítás a két fajta mérés között, és mi a jelölt véleménye a két módszer használhatóságáról?”

A lock-in erősítő a jel/zaj viszony rendkívül nagy erősítését végzi azzal, hogy egy frekvencia nagyon szűk környezetében erősíti csak a jelet, a többi komponenst, szélessávú zajt pedig nagyon elnyomja, mint egy rendkívül keskeny sávú lineáris szűrő. A sztochasztikus rezonancia ezzel szemben nemlineáris működés következménye, ami a zaj spektrális eloszlását módosítja. Ebben hasonlít az A/D konverterekben alkalmazott delta-sigma modulációra, bár a mechanizmus más.

A sztochasztikus rezonancia vagy dithering leginkább érzékelési küszöb, felbontás alatti jelek detektálásánál jut szerephez, amihez ráadásul optimális zaj szükséges, azaz túl kicsi vagy túl nagy sem jó – a jel és zaj amplitúdója hasonló nagyságú. A lock-in esetében ilyen korlát nincs, sőt, épp nagyobb zajoknál előnyös a használata. A sztochasztikus rezonancia legtöbbször nem is jár együtt jel/zaj viszony erősítéssel. Az analóg-digitál átalakítókba épített dithering zajgenerátor sem a jel/zaj viszonyt, hanem a linearitást javítja. A kérdés felvetése ugyanakkor indokolt, hiszen elérhető sztochasztikus rezonanciával is jel/zaj viszony erősítés. Ez nem összemérhető egy lock-in erősítőével, még egyszerűbb lineáris szűrőkével sem. Az eddigi kutatások alapján én úgy látom, hogy a sztochasztikus rezonancia jelentősége leginkább kis jelek mérhetővé tételében, bizonyos technikai alkalmazásokban illetve valós rendszerek – köztük talán leginkább biológiai rendszerek, idegsejtek – működésének megértésében van. Ez utóbbihoz kapcsolódik egy Nature cikk [4.9] és egy másik nagy presztízsű folyóiratban megjelent cikk.

- [4.1] L.B. Kiss, “Possible Breakthrough: Significant Improvement of Signal to Noise Ratio by Stochastic Resonance”, 3rd International Conference on Chaotic, Fractal, and Nonlinear Signal Processing Mystic, Connecticut, USA, July 1995, http://www.ece.tamu.edu/~noise/research_files/mystic.pdf
- [4.2] Nozaki D, Yamamoto Y, Enhancement of stochastic resonance in a FitzHugh-Nagumo neuronal model driven by colored noise. *Physics Letters, Section A: General, Atomic And Solid State Physics* 243:(5-6), pp.281-287. (1998), [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9601\(98\)00247-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9601(98)00247-3)
- [4.3] Nozaki D, Mar DJ, Grigg P and Collins JJ, Effects of Colored Noise on Stochastic Resonance in Sensory Neurons. *Physical Review Letters* 82 p. 2402 (1999), <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.2402>
- [4.4] Nozaki D, Collins JJ and Yamamoto Y, Mechanism of stochastic resonance enhancement in neuronal models driven by $1/f$ noise, *Physical Review E* 60 p.4637 (1999), <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.60.4637>
- [4.5] J Kallunki and M Dubé and T Ala-Nissila Year, Stochastic resonance and diffusion in periodic potentials, *Journal of Physics: Condensed Matter* Volume 11 Number 49 (1999) <http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/11/49/301>
- [4.6] M. Gitterman, Stochastic resonance in one-dimensional diffusion with one reflecting and one absorbing end point, *Phys. Rev. E* 61, 4726–4731 (2000), <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.61.4726>
- [4.7] Tamas Fulei, Zoltan Gingl and Peter Makra, Mechanism of signal-to-noise ratio gain in a monostable threshold stochastic resonators, *Proc. SPIE 5114, Noise in Complex Systems and Stochastic Dynamics*, 327 (May 8, 2003) <http://dx.doi.org/10.1117/12.496956> ,
- [4.8] Mingesz R, Gingl Z, Almasi G, Csengeri A, Makra P, Utilising jitter noise in the precise synchronisation of laser pulses. *Fluctuation And Noise Letters* 8:(1) pp. L41-L49. (2008), <http://dx.doi.org/10.1142/S0219477508004258>

- [4.9] David F. Russell, Lon A. Wilkens & Frank Moss, *Use of behavioural stochastic resonance by paddle fish for feeding*, Nature 402, 291-294 (18 November 1999), <http://dx.doi.org/10.1038/46279>
- [4.10] Hidaka, Ichiro, Daichi Nozaki, and Yoshiharu Yamamoto. "Functional stochastic resonance in the human brain: noise induced sensitization of baroreflex system." *Physical Review Letters* 85, no. 17 (2000): 3740. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3740>

5. tézispont

A bíráló ennél a tézispontnál két kérdést tett fel.

„Én egyetlen ábrát sem láttam, amely igazolná, hogy valóban specifikus a javasolt mérés – igaz-e ez?”

A mért spektrumok valóban meglehetősen egyformák, amik nem kedvezők a fluktuációkkal javított érzékeléshez (FES), hiszen ott főleg a spektrum alakjának megváltozásából próbálunk meg információt szerezni. Azért is volt szükség komolyabb átlagolásra, precíz mérésre és a PCA analízisre, hogy a kis különbségből is lehessen következtetni a koncentrációra. Olyan ábrát mutattam (a disszertáció 78-79. oldalain, 5.13, 5.14, 5.15 ábrák), mely ezt illusztrálja, de jogos a probléma felvetése, hogy nem egy azonnal és jó minőségben, a vetélytárs módszereknél előnyösebb megoldást sikerült volna találni. A FES módszert lehet többféle anyagnál használni, a legutóbbi konferencián (ahol meghívott előadóként éppen egy nagyon kompakt FES modul kifejlesztéséről számoltam be [5.1]) graphene mintáknál találtak kutatók jelentősebb spektrumváltozást [5.2]. A FES módszer nagy előnye épp abban van, hogy a zaj által több információt kaphatunk, mint pusztán a szenzor ellenállásának mérésével, ráadásul van esély rendkívül kompakt, akár vezeték nélküli szenzormodulok készítésére [5.1]

A másik kérdés: *„A mi Intézetünkben egyéb tulajdonságokat – pl. felületi hullámszűrők rezonancia frekvenciájának a változását, kapacitás érték változást, hullámvezetők optikai tulajdonságának a változását .. – is használtunk a vezetőképesség változásán kívül, és azt találtuk, hogy bár az érzékenység különböző lehet, specifikus megkülönböztetés csak különböző érzékenyítés és/vagy többféle mérés összehasonlítása segítségével lehetséges. Saját tapasztalatai alapján mi erről a jelölt véleménye?”*

Ezt az eddigiek alapján én is így látom, a CNT szenzorokkal elért eredmények ezt mutatják. Ugyanakkor például a disszertáció 5.20 ábrája jobb szelektivitást mutat, a spektrum alakja elég erősen eltér különböző esetekben és az előző kérdésre adott válaszomban említett eredmény [5.2] is biztató FES alkalmazásokhoz.

Professzor úr a biológiai vonatkozású mérések kapcsán megemlíti, hogy sajnálja, hogy ez nem a Szegeden kiemelkedő színvonalú biológiai kutatásokkal együttműködésben történt. Ez valóban így van, de a mérések elvégzésébe közvetlenül nem kapcsolódtam be, egyetlen kapcsolódó publikációban szerepelek csak szerzőként. Köszönöm ugyanakkor a bírálói megjegyzést, mert én is kiemelten fontosnak tartom a hazai együttműködéseket. Azt, hogy erre törekszem is, mutatja egyetemünk Általános Orvostudományi Kara négy kutatócsoportjával közös 58 publikációnk, emellett karunkon belül további nyolc fizikai, biofizikai, kémiai, mesterséges intelligencia kutatócsoporttal dolgoztam együtt összesen 18 publikáció eredményeinek elérésében. Ezek egy részét a tézispontok végén levő „Interdiszciplináris alkalmazások, az eredmények hasznosítása” alpontban is megemlítettem. Kutatócsoportom egyik legérdekesebb új eredménye a szegedi kajakosokkal közös munkánkra épül, melyben az evezés véletlenszerű fluktuációinak elemzésével igyekszünk az

vezetés minőségét jellemző mennyiségeket találni. A mérésekhez egyedi műszert is fejlesztettünk. Tavaly két nemzetközi publikációnk jelent meg a témában [5.3, 5.4].

- [5.1] *International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF2013)*, Montpellier, 24-28 June 2013, <http://icnf.wordpress.com/invited-speakers/>, Gingl, Z.; Mingesz, R.; Vadai, G.; Balogh, K.S.; Erdelyi, A., "Fluctuation enhanced gas detector for wireless sensor networks," <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6578901>
- [5.2] Liu, G.; Rumyantsev, S.L.; Balandin, A.A.; Shur, M.S., "Surface and volume 1/f noise in multi-layer graphene," *Noise and Fluctuations (ICNF)*, 2013 22nd International Conference on , vol., no., pp.1,4, 24-28 June 2013
<http://dx.doi.org/10.1109/ICNF.2013.6578991>
- [5.3] Vadai, G.; Gingl, Z.; Mingesz, R.; Makan, G., "Performance estimation of kayak paddlers based on fluctuation analysis of movement signals," *Noise and Fluctuations (ICNF)*, 2013 22nd International Conference on , vol., no., pp.1,4, 24-28 June 2013,
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6579010>
- [5.4] Vadai, G.; Makan, G.; Gingl, Z.; Mingesz, R.; Mellar, J.; Szepe, T.; Csamango, A., "On-water measurement and analysis system for estimating kayak paddlers' performance," *Information & Communication Technology Electronics & Microelectronics (MIPRO)*, 2013 36th International Convention on , vol., no., pp.131,136, 20-24 May 2013,
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6596238>

6. tézispont

Professzor úr felveti, hogy „*A rendszer csak akkor működik, ha a két felhasználót (alacsony ellenállású) elektromos vezető köti össze – ma, nagy általánosságban e helyett bármi, mikrohullámú link, üvegszál... lehet a vezeték helyett! Míg a szokásos kódolásokat ez nem korlátozza, nem zárja-e ki a javasolt zaj-alapú kommunikáció lehetőségét?*”

Az igaz, hogy ehhez az elvhez vezeték szükséges, mint ahogy az is, hogy ma már valóban sok alternatív információátviteli mód elterjedt. Ugyanakkor a vezetékek számos esetben nem kiválthatók, például ahol egyúttal az energiaellátást is közvetítik. Emellett rendkívül sok helyen található vezetékes hálózat, például ethernet, ami szintén potenciálisan kihasználható. Elképzelhető az is, hogy egymáshoz közeli áramkörök, berendezések kommunikációját (például processzor és háttértárolók) kell titkosítani, biztonságos hardverkulcsokat kell létrehozni. Kish professzor és mások is rámutattak már számos ilyen lehetőségre, ezekből válogattam ki néhány publikációt a lentebbi hivatkozási listában [6.1-6.4]

Bírálom másik megjegyzése és kérdése: „*Általánosan igaz, hogy az egyre növekvő információ áradat miatt a kommunikáció sebessége is egyre nő – megvalósítható-e igen nagy sebességű információ átadás a zaj segítségével „kódolt” biztonságos kommunikáció esetében?*”

A bemutatott módszer inkább kulscsereére alkalmas, nem a teljes információ átvitelére. Általános megoldás nagy sebességek elérésére az lehet, hogy a kulscsere a biztonságos vonalon történik, míg az adatok kódolva akár normál internetes kapcsolaton terjednek.

- [6.1] Kish, Laszlo B., and Olivier Saidi. "Unconditionally secure computers, algorithms and hardware, such as memories, processors, keyboards, flash and hard drives." *Fluctuation and Noise Letters* 8, no. 02 (2008): L95-L98. <http://arxiv.org/pdf/0803.4479>

- [6.2] Gonzalez E, Kish LB, Balog RS, Enjeti P (2013) *Information Theoretically Secure, Enhanced Johnson Noise Based Key Distribution over the Smart Grid with Switched Filters*. PLoS ONE 8(7): e70206. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0070206>
- [6.3] Lin, P. K., Alex Ivanov, Bradley Johnson, and Sunil P. Khatri. "A novel cryptographic key exchange scheme using resistors." In *Computer Design (ICCD), 2011 IEEE 29th International Conference on*, pp. 451-452. IEEE, 2011., <http://dx.doi.org/10.1109/ICCD.2011.6081445>
- [6.4] Laszlo B. Kish, Chiman Kwan, *Physical Uncloneable Function Hardware Keys Utilizing Kirchhoff-Law-Johnson-Noise Secure Key Exchange and Noise-Based Logic, Fluctuation and Noise Letters*, 12, 1350018 (2013) <http://dx.doi.org/10.1142/S0219477513500181>, <http://vixra.org/abs/1305.0068>

Összefoglalva válaszomat, újból nagyon köszönöm a disszertáció és kapcsolódó tudományos munkám gondos átnézését, a kérdéseket és a biztatást is több kutatási téma további vizsgálatára. Remélem sikerült minden felvetett kérdésre és problémára kielégítő választ adnom.

Köszönöm, hogy professzor úr javasolja a nyilvános vitát és a MTA doktori cím odaítélését.

Szeged, 2014. január 13.

Gingl Zoltán