

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK
Fizika Doktori Iskola

Az $1/f$ -zaj időbeli szerkezete és a zajanalízis alkalmazásai

Doktori értekezés tézisei

Készítette:
Mingesz Róbert

Témavezető:
Dr Gingl Zoltán
egyetemi docens

SZEGED
2008

Bevezetés

A természetben előforduló folyamatok nagy részének alapvető tulajdonsága a véletlenszerűség. Ezen folyamatok jövőbeli viselkedését nem tudjuk egyértelműen megjósolni, legfeljebb valószínűségeket fogalmazhatunk meg. Ennek a kiszámíthatatlanságnak az egyik oka az, hogy a rendszerek sokszor túlságosan is bonyolultak ahhoz, hogy egzaktul leírassuk őket. A megjósolhatatlanság másik okára a kvantummechanika mutatott rá: a természetben valódi véletlen is előfordulhat, vannak olyan törvények, melyek kimenetelei nem konkrét értékeket, hanem valószínűségeket adnak meg.

Az előforduló véletlen jelenségek miatt egy fizikai rendszer vizsgálata során mért mennyiségek is folyamatosan ingadoznak. Ezt sokszor a mérést korlátozó tényezőként tartják számon. Az utóbbi időben viszont egyre gyakrabban merül fel a zajok információforrásként való felhasználása. A rendszerekből jövő fluktuációk magáról a rendszerről árulnak el információkat. Véletlen jellegű jeleket használhatunk rendszerek vizsgálatára, pl. az átviteli függvény mérésére is. Bizonyos esetekben pedig felmerül a zaj konstruktív szerepe is, mint a dithering, vagy a sztochasztikus rezonancia esetében.

Ahhoz, hogy kihasználhassuk a zajok analízisében rejlő lehetőségeket, szükségünk van a zajok mélyreható ismeretére. Ismernünk kell a zajok alapvető tulajdonságait, ismernünk kell a fluktuációk viselkedését nemlineáris rendszerekben, továbbá megfelelő módszereket kell kifejlesztenünk a zajok mérésére és feldolgozására.

Munkám egyik részében az $1/f$ -zaj időbeli tulajdonságait tanulmányoztam. Az $1/f$ -zaj igen széleskörűen előfordul a természetben, számos folyamatban megfigyelhetjük. Ennek ellenére még nem rendelkezünk egy univerzális modellel, mely leírná keletkezését, vagy előre megjósolná tulajdonságait. Dolgozatomban az

$1/f^\alpha$ -zaj szintmetszeteinek tulajdonságait vizsgálom. E területen már korábban is végeztek vizsgálatokat, de csak speciális esetekre. Célul tűztem ki, hogy különböző, $1/f^\alpha$ ($0 \leq \alpha \leq 2$) színes zajokra megvizsgáljam a szintmetszetek statisztikáját, és a szintmetszetek közötti korrelációt, továbbá hogy kiegészítsem az eddigi elméleti eredményeket. Az eredmények számos helyen alkalmazhatók, például a sztochasztikus rezonancia elméleti vizsgálatára, de akár rendszerek elemzésére is (pl. hibakeresésre).

Kutatásaim során számos numerikus szimulációt végeztem, mind LabVIEW programozási környezetben, mind JAVA-ban írt programok segítségével. Természetesen valódi méréseket is végeztem, egyrészt a szimulációk alátámasztására, másrészt pedig olyan jelenségek vizsgálatára is, melyek nehézségbe ütköztek volna numerikus szimulációk esetén. Mind a szimulációk, mind a valódi mérések esetén különböző zajgenerátorokat használtam fel, így ezek fejlesztésével és vizsgálatával is foglalkoztam. Meghatározott tulajdonságú véletlen jeleket (zajokat) különböző módokon hozhatunk létre. Ha analóg jelekre van szükségünk, akkor felhasználhatjuk például a félvezetőkben keletkező zajokat, a megfelelő spektrális menet eléréséhez pedig szűrőket is alkalmazhatunk. Ezen módszerek hátránya, hogy tulajdonságaikat nehéz az igényeinknek megfelelően hangolni. Digitális jelgenerálással sokkal rugalmasabb jelgenerátorokat hozhatunk létre. Dolgozatomban egy digitális jelprocesszoron alapuló analóg zajgenerátor elvét részletezem, elemzem az előforduló problémákat, és azok megoldását.

A sztochasztikus rezonancia egy olyan jelenségkör, amelyben közvetlenül megfigyelhetjük és pontosan mérhetjük is a zajok konstruktív szerepét. Ezekben az esetekben a rendszerben lévő, vagy a rendszerhez hozzáadott zaj megfelelő mennyisége optimalizálhatja a rendszer kimenetén mérhető jel-zaj viszonyt. Sztochasztikus rezonanciát számos rendszerben figyeltek meg, biológiai és

technikai rendszerekben, de a jégkorszakok váltakozását is magyarázhatja. Korábban a legtöbb vizsgálat periodikus jelekkel történt, viszonylag kevés cikkben tárgyalnak aperiodikus eseteket. Munkám során az utóbbi vizsgálatokat folytattam, aperiodikus jeleket használtam fel nemlineáris rendszerek tanulmányozására. A jel-zaj viszony meghatározására keresztjeljesítménysűrűség-spektrumot és keresztkorrelációs módszereket használtam.

A zajok konstruktív szerepe egyelőre nem várt helyen is felbukkant. Munkatársaim segítségével elkészítettünk egy eszközt, mely egy excimer lézer impulzusainak precíz szinkronizálását vezérli. A feladat az volt, hogy a lézer teljes késleltetését állandó szinten tartsuk, kompenzálva a lézer késleltetésének lassú időbeli driftjét. A feladatot úgy oldottuk meg, hogy egy programozható késleltetést iktattunk a trigger jel és a lézert indító áramkör közé. A megoldást két elem nehezítette: a késleltetés detektálásának viszonylag nagy ablakszélessége, továbbá a lézer véletlenszerű jittere. Azonban mint utólag kiderült, ez utóbbi, a szabályozás szempontjából nem egyértelműen káros. Én a rendszer szabályozó algoritmusát dolgoztam ki és elemeztem a működését, továbbá azt, hogy a kompenzálhatatlan jitter hogyan befolyásolja a szabályozás teljesítményét.

Új tudományos eredmények

1. Kollégáimmal egy DSP (digitális jelprocesszor) alapú $1/f^\alpha$ zajgenerátort fejlesztettünk ki. Az eszközben megfelelően paraméterezett digitális szűrőkkel állítottuk elő a kívánt zajnak megfelelő adatsort, majd ezt követően egy D/A-konverter segítségével kaptuk meg az analóg jelet.

Munkám során megmutattam, hogy milyen jelenségek torzíthatják a létrehozó zaj spektrális alakját, ezek közül a legfontosabb a szűrők aszimmetrikus elhelyezkedése a szűrőlánc

szélein. Ezeket az eltéréseket az egyes szűrők amplitúdójának módosításával tudjuk kezelni. Bevezettem egy Monte-Carlo alapú optimalizálási eljárást, amely alkalmas az ideális szűrőparaméterek kiszámolására. Numerikus szimulációkkal optimalizáltam a digitális szűrők paraméterezését, hogy azok a lehető legjobban kihasználhassák a DSP 16 bites fixpontos számábrázolásának a lehetőségeit. Megvizsgáltam azt is, hogy a DSP fixpontos számolása mennyire befolyásolja a létrehozott zaj pontosságát, és azt találtam, hogy a generált zaj bőven megfelel az igényeinknek. A zajgenerátort megvalósítottuk, $1/f$ -zaj esetén több mint négy dekádon keresztül a kívánt frekvenciamenetet adja, a maximális mintavételi frekvencia pedig eléri a 300 kHz-et. [1, 9].

2. Numerikus szimulációk segítségével megvizsgáltam az $1/f^\alpha$ -zajok szintmetszési tulajdonságait. Vizsgáltam a szintmetszettek statisztikájának a zaj kitevőjétől és a metszett szint értékétől való függését. Megvizsgáltam, hogy a szintmetszettek statisztikája függ-e a zajgenerálási elvtől, továbbá az eredményeket valódi mérésekkel is összevetettem. Eredményeim azt mutatják, hogy a statisztika elsősorban a kitevőtől és a metszett szinttől függ, a zaj forrásától nem. Vizsgáltam a zaj sávszélességének hatását a szintmetszettek eloszlására, az eredmények alapján arra a következtetésre jutottam, hogy mind az alsó, mind a felső határfrekvencia jelentős hatással van az $1/f$ -zaj szintmetszési tulajdonságaira. [4, 7]
3. Numerikus szimulációk segítségével megvizsgáltam az egymás utáni szintmetszettek közötti korrelációt. Eredményként azt kaptam, hogy $1/f$ -zaj esetén a korreláció értéke kiemelkedően magas, ez is az $1/f$ -zaj kitüntetett szerepére utal. Ha a szintmetszettek statisztikáját felhasználva, korreláció nélkül, vagy csupán a szomszédos intervallumok között korrelációt

felhasználva próbáljuk rekonstruálni a zajt, nem $1/f$ -zajt kapunk. Ebből arra következtetünk, hogy a szintmetszetek közötti korreláció egyértelműen az $1/f$ -zaj tulajdonságaihoz köthető, és az nem a zajgenerátorok esetleges hiányossága. [4]

4. Fehérzaj és $1/f^2$ -zaj esetén a mérések eredményeit elméletekkel is alátámasztottam: a mérések során kapott statisztika pontosan megegyezik az elméletek által jósolttal. Fehérzaj esetén egy exponenciális lecsengésű statisztikát kapunk, $1/f^2$ zaj esetén pedig egy hatványfüggvényt. $1/f$ -zaj esetén irodalmi források hatványfüggvényt jósolnak, itt eltérés van a kísérleti eredményekhez képest. Figyelembe véve a mérések eredményeit, úgy vélem, hogy az eltérés egyik okozója a zaj alsó és felső határfrekvenciája.

A kísérleti adatokra két paramétert tartalmazó függvényt illesztettem, és megállapítottam e két paraméternek a zaj kitévőjétől való függését. Az $1/f$ -zaj kitüntetett szerepe e paraméterek menetéből is kitűnt. [7, 8]

5. L. B. Kish munkája nyomán megvizsgáltam a sztochasztikus rezonancia lehetőségét nem periodikus gerjesztőjelek esetén. Három rendszert vizsgáltam: numerikus szimulációk segítségével a Schmitt-triggert és a szintmetszédetektort, analóg számítógépes módszerrel pedig a kettős potenciálvölgyet. Periodikus jelekkel gerjesztve a rendszert összehasonlítottam a hagyományos jel-zaj definíciók működését az általam használt keresztjeljesítménysűrűség-spektrumon és keresztkorreláción alapuló módszerekkel. Mind a szimulációk, mind a mérések eredményei azt mutatják, hogy a kereszt-spektrális analízis korlátozások nélkül használható a jel-zaj viszony jellemzésére, a keresztkorreláció pedig hasznos adalékokkal szolgálhat a rendszer működéséről.

Felhasználva az újonnan bevezetett módszereket a jel és a zaj szétválasztására, gerjesztőjelként keskenysávú zajt és (nem periodikus) impulzussorozatot is használtam. Az eredmények azt mutatják, hogy sztochasztikus rezonancia mindhárom rendszerben fellép aperiodikus gerjesztés esetén is, ráadásul jel-zaj viszony erősítést is kaphatunk megfelelő zajintenzitások esetén.

Az irodalomban elterjedt nézetek szerint jelentős jel-zaj viszony erősítést elsősorban a küszöbhöz közeli, impulzusszerű jelek esetén várhatunk. A vizsgálatok során azonban azt találtam, hogy számos jel esetén kaphatunk jel-zaj viszony erősítést, ráadásul az sem szükséges feltétel, hogy a küszöbszinthez közel legyünk. Ez alapján azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a korábbi szigorú feltételek inkább a jel-zaj viszony korábbi definíciójához köthetők, mint magához a sztochasztikus rezonanciához. [2, 5, 6]

6. A lézerimpulzusok precíz szinkronizálását végző eszköz számára egy adaptív átlagolás alapján működő algoritmust dolgoztam ki. Az elkészített eszköz alkalmas volt arra, hogy az általa vezérelt lézer driftjét megbízhatóan és stabilan kompenzálja még az időnként előforduló kirívó impulzusok esetén is. Numerikus szimulációk segítségével megvizsgáltam a szabályozás teljesítményének függését a jitter nagyságának függvényében, és kimutattam, hogy az algoritmus a sztochasztikus rezonanciára jellemző viselkedést mutat. Megfelelő nagyságú jitter esetén a szabályozás hibája (mellyel a driftet kompenzáljuk) bőven a detektálási időablak mérete alá vihető (miközben az időablak mérete 6 ns, addig a hiba 0,25 ns-ra is csökkenhet). [3, 10]

Az értekezés alapjául szolgáló közlemények

- [1] MINGESZ R – BARA P – GINGL Z – MAKRA P: Digital Signal Processor (DSP) based $1/f^\alpha$ noise generator. *Fluctuation and Noise Letters* , vol 4 (2004) L605–L616. p.
- [2] 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.
- [3] MINGESZ R – GINGL Z – ALMÁSI G – CSENGERI A – MAKRA P: Utilising jitter noise in the precise synchronization of laser pulses. *Fluctuation and Noise Letters* , vol 8 (2008) L41–L49. 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] 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.

- [6] 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.
- [7] MINGESZ R – GINGL Z – MAKRA P: Level-crossing time statistics of Gaussian $1/f^\alpha$ noises. *Fluctuations and Noise*. Santa Fe, New Mexico, USA, 2003. június 1–4. In SIKULA, J (ED): *Proceedings of SPIE volume 5110: Fluctuations and Noise in Biological, Biophysical, and Biomedical Systems*, edited by Sergey M Bezrukov &al. Bellingham, 2003, SPIE, 312–319. p.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] MINGESZ R – GINGL Z – ALMÁSI G – MAKRA P: Utilising jitter noise in the precise synchronization of laser pulses. *Fluctuations and Noise 2007*. Firenze, Olaszország, 2007. május 21–24. In MASSIMO MACUCCI &al(ED): *Noise and fluctuations in circuits, devices and materials (Proceedings of SPIE Vol 6600)*. Bellingham, 2007, SPIE, 6600 OZ. p.

További közlemények

- [11] KISH L B – MINGESZ R: Totally secure classical networks with multipoint telecloning (teleportation) of classical bits through loops with Johnson-like noise. *Fluctuation and Noise Letters* , vol 6 (2006) C9–C21. p.
- [12] 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.
- [13] KISH L B – MINGESZ R – GINGL Z: Thermal noise informatics: totally secure communication via a wire, zero-power communication and thermal noise driven computing. *Fluctuations and Noise 2007*. Firenze, Olaszország, 2007. május 21–24. In MASSIMO MACUCCI &al(ED): *Noise and fluctuations in circuits, devices and materials (Proceedings of SPIE Vol 6600)*. , 2007, SPIE, 6600 03. p.
- [14] 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.