



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Neutronmultiplicitás-számlálás folytonos detektorjelek elemzésével

PhD Tézisfüzet

Nagy Lajos

Témavezetők: Dr. Szieberth Máté
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Prof. Pázsit Imre
Chalmers Műszaki Egyetem

Budapest
2021

1. A kutatások előzménye

A neutronmultiplicitás-számlálás (*neutron multiplicity counting*) egy széleskörűen elterjedt, nem-destruktív módszer a hasadóanyagok (elsősorban plutónium) tömegének mérésére [Langner, 1998]. A mérés célja a szinglet, dublet és triplet detektálási ráták becslése, amik rendre egy-, kettő-, illetve három, egyazon kibocsátásból származó neutron detektálásának intenzitását adják meg. A minta tömegét ezt követően algebrai inverzió útján kapjuk meg a detektálási rátákból. A méréseket hagyományosan ^3He -gázzal töltött detektorokkal végzik és a detektálási rátákat ezek impulzusszámlálási statisztikájából határozzák meg. Ez a megközelítés azonban több gyakorlati nehézséggel is jár. Az egyik legfőbb problémát az impulzusok átlapolásából eredő holtidő okozza, ami a számláló áramkörökben számlálási veszteséghez vezet. Bár rendelkezésre állnak különböző holtidő-korrekciós eljárások [Croft, 2012], használatuk a mérsékelt számlálási sebességekre korlátozódik; jelentősen nagy számlálási sebesség mellett (például kiegészített üzemanyag mérés esetén [Reilly, 1991]) használhatatlanná válnak. Egy másik (tisztán technikai jellegű) probléma a ^3He globális hiánya, amely kulcsfontosságú eleme a mérésekhez használt neutrontetektoroknak [Henzlova, 2015].

2. Célkitűzések

A fenti problémák leküzdése végett kifejlesztésre került a neutronmultiplicitás-számlálás alternatív változata. A folytonos detektorjelek egy nemrégiben közölt sztochasztikus modelljére [Pál, 2014] támaszkodva az új módszer a neutrontetektorok (elsősorban hasadási kamrák) folytonos feszültségjeleinek elemzésén alapszik. A módszer alkalmazásakor a szinglet, dublet és triplet detektálási ráták értékeit a mért jelek megfelelő momentumaiból (kumulánsaiból) határozzuk meg. Mivel az eljárás nem az egyedi impulzusok megszámlálására hagyatkozik, érzéketlen azok átlapolására. Ennek eredményeképpen a detektálási ráták az új módszer segítségével még lényegesen nagy számlálási sebességek mellett is meghatározhatóak, ezáltal pedig életképes alternatívája a hagyományos multiplicitás-számlálásnak, különösen nagy intenzitású minták (mint például a kiegészített üzemanyag) mérésekor.

3. Vizsgálati módszerek

A javasolt módszer elméleti alapjait azok az egyenletek alkotják, amelyek kapcsolatot teremtenek a folytonos detektorjelek megfelelő momentumaival, valamint a szinglet, dublet és triplet detektálási ráták között. A momentumokat megadó kifejezéseket egy *master-egyenlet*en alapuló formalizmussal határozzuk meg. A levezetés a detektorjel valószínűségi sűrűségfüggvényére vonatkozó *backward master-egyenlet* felírásával kezdődik. Hosszadalmas matematikai átalakításokat követően a kumuláns-generáló függvény zárt, analitikus kifejezésére jutunk. A kumulánsok kifejezéseit végül ennek a függvénynek a deriválásával kapjuk. Az elméleti modell fejlődése három szakaszon ment keresztül. Az első szakaszban a jelek (időben) egy pont-momentumaival (köztük az átlag és a kovariancia) kerültek meghatározásra azzal a feltevessel, hogy a mintából kibocsátott neutronok még ugyanabban a pillanatban detektálásra kerülnek. A

második szakaszban ugyanazok a momentumok kerültek újra kiszámításra, feltételezve azonban, hogy a neutronok detektálása – kibocsátásuk időpontjához képest – egy véletlen időkéséssel történik. A harmadik szakaszban – fenntartva a késleltetett detektálás feltevését – a jelek némely (időben) kétpont- és hárompont-momentumait (köztük a kovarianciafüggvényt és a bikovariancia-függvényt) is meghatározzuk. Végül olyan egyenletek kerülnek bemutatásra, amelyek a szinglet, dublet és triplet detektálási rátákat egy nagy detektorrendszer mért jeleinek momentumaival fejezik ki, és amelyek így közvetlenül használhatóak a mérések elemzésekor.

Szimulációk útján vizsgáltam az új módszer tulajdonságait. A folytonos detektorjelek (szimuláltak és mértek egyaránt) számítógépen való egységes tárolása és kezelése céljából egy dedikált fájlformátumot hoztam létre. A detektorok jeleinek szimulációjához számítógépes programot írtam. Egy másik programot is készítettem, amely a jelek momentumait képes megbecsülni. A két program működését úgy ellenőriztem, hogy szimulált jelekből nyert detektálási ráták értékeit analitikus referencia-értékekkel vetettem össze. Ezt követően nagyszámú jelet szimuláltam és elemeztem, hogy megvizsgáljam különböző paramétereknek (mérési idő, detektálási hatások, elektronikai zaj és nem-neutron által generált impulzusok) a becsült detektálási rátákra gyakorolt hatását. Végül összehasonlítottam, miképpen befolyásolja a detektálási ráták értékeit a pulzusok átlapolása attól függően, hogy azokat a folytonos jelek momentumaiból vagy impulzusszámlálással határozom meg.

A javasolt módszernek a gyakorlatban történő demonstrációja céljából megtervezünk és a Kiotói Egyetem *Kyoto University Critical Assembly (KUCA)* létesítményében felépítettünk egy olyan mérési elrendezést, amely tartalmaz négy hasadási kamrát, egy ^{252}Cf forrást, valamint ^{235}U lapokat. Az elrendezést Monte Carlo szimulációk segítségével optimalizáltuk. A detektorok feszültségjeleinek rögzítésére egy FPGA alapú, gyors adatgyűjtő rendszert állítottunk össze. Két mérési konfigurációban detektoronként 14 órányi jelet rögzítettünk. A jeleket elemezve megbecsültem azok momentumait, amikből meghatároztam a szinglet és a dublet detektálási ráták értékeit. A mérési összeállítás alacsony detektálási hatások, továbbá az adatgyűjtő rendszer korlátai miatt a triplet rátákat nem lehetett kinyerni. A detektálási rátákat egy egycsatornás analizátor segítségével a hagyományos, impulzusszámláláson alapuló eljárással is megbecsültük. A kétféle módszerrel kapott értékeket összehasonlítva következtetést vonok le az újonnan javasolt módszer alkalmazhatóságára.

4. Új tudományos eredmények

A disszertációban bemutatott új tudományos eredmények az alábbi tézispontok formájában foglalhatóak össze:

- 1. tézispont.** Továbbfejlesztettem a neutronmultiplicitás-számlálás új, a folytonos detektorjelek (időbeli) egy pont-momentumainak becslésén alapuló formájának az előzetes elméletét. Míg az eredeti modell feltételezése szerint kibocsátásukat követően a neutronok azonnal detektálásra kerülnek, a neutronok rendszerbeli migrációjának leírására bevezettem egy a detektálást megelőző véletlen időkésést. Egy master-egyenleten alapuló formalizmussal számos egy pont-momentum (köztük az átlagérték és a kovariancia) kifejezését levezettem. Analitikus megfontolások útján megmutattam, hogy ebben a továbbfejlesztett modellben a

szinglet, dublet és triplet detektálási ráták kinyerhetőek a detektorjelek egy pont-momentumaiból az olyan gyors-spektrumú rendszerekben, ahol az átlagos időkézés rövid a feszültségimpulzusok hosszához képest, így az azonos kibocsátás által generált impulzusok időben fedik egymást. Megmutattam ugyanakkor, hogy a termikus spektrumú rendszerekben, amelyeket döntő részben használnak mérésekre és amelyekben az átlagos időkézés sokkal hosszabb mint a tipikus feszültségimpulzus, a dubletre és a tripletre vonatkozó információ eltűnik a jelek egy pont-momentumaiból, mivel az azonos kibocsátás által generált impulzusok időben szétszóródnak. Emiatt ilyen rendszerekben csak a szinglet ráta határozható meg. [P1, P2, P3, P8]

2. tézispont. Továbbfejlesztettem a 1. tézispontban bemutatott elméletet. A detektorjelek egy pont-momentumainak használatán túl bevezettem a (időben) kétpont- és hárompont-momentumaik használatát is, mivel ezek képesek leírni a jelek különböző pontjai között fennálló időbeli korrelációkat. Egy master-egyenleten alapuló formalizmussal számos kétpont- és hárompont-momentum (köztük az kovarianciafüggvény és a bikovariancia-függvény) kifejezését levezettem. Kiszámítottam ezen momentumok paramétereik szerinti integráljait és megmutattam, hogy azok értékei (egy kivétellel) függetlenek az időkézésétől, mivel az integrálási folyamat az azonos kibocsátás által generált időben szétszóródott impulzusokat fedésbe hozza. Ennek következtében analitikus megfontolások útján megtudtam mutatni, hogy – szemben az egy pont-momentumokkal – a kétpont- és hárompont-momentumok integráljaiból nem tűnik el a dublet és triplet rátákra vonatkozó információ még akkor sem, amikor az átlagos időkézés a feszültségimpulzusokhoz képest naggyá válik. Ennek eredményeképpen a kétpont- és hárompont-momentumok használatával a dublet és a triplet ráták még termikus spektrumú rendszerekben is meghatározhatóak. [P4, P8]

3. tézispont. Létrehoztam egy gyakorlati eljárást a szinglet, dublet és triplet detektálási ráták meghatározására egy nagyszámú detektorból álló rendszer tagjai által rögzített folytonos jelekből. Numerikus algoritmust terveztem a rögzített folytonos detektorjeleknek az 1. és 2. tézispontokban leírt, (időben) egy pont-, kétpont- és hárompont-momentumainak hatékony becslésére. Felhasználva ezeknek a momentumoknak az 1. és 2. tézispontok elméleti modelljei által nyújtott kifejezéseit, levezettem egy egyenletrendszer, amely a szinglet, dublet és triplet detektálási rátákat kifejezi a jelek összes lehetséges kombinációjából becsült momentumokkal, felhasználva ezáltal a bennük fellelhető összes információt. Az így létrehozott eljárással szimulált detektorjeleket elemezve megmutattam, hogy az képes becsléssel szolgálni a szinglet és dublet detektálási ráták értékeire és a becslések megfelelnek az elméleti várakozásoknak. A triplet detektálási ráták kinyerésének képességét nem sikerült igazolni a becslő numerikus instabilitása miatt. [P5, P6, P7, P9, P10, P11]

4. tézispont. A 3. tézispontban ismertetett eljárással nagyszámú szimulált mérést elemezve megvizsgáltam a következő paramétereknek a becsült detektálási ráták értékre és/vagy pontosságára gyakorolt hatását: a mérési idő, a detektor hatásfoka, az elektronikai fehérzaj amplitúdója, valamint a Poisson statisztikájú nem-neutron forrás által keltett kis amplitúdójú parazita-impulzusok jelenléte. Megmutattam, hogy a mérési idő és a detektálási hatásfok a szinglet és a dublet

ráták esetében azoknak mind az értékét, mint a pontosságát erősen befolyásolja; az elektronikai zaj hatása valamennyi esetben gyakorlatilag elhanyagolható; a nem-neutron impulzusok nincsenek hatással a dublet rátára, a szinglet ráta becslését viszont torzítják, ez azonban könnyen korrigálható. Végül bemutattam, hogy míg a hagyományos, impulzusszámláláson alapuló eljárás a szinglet és a dublet ráták értékeit nagy számlálási sebességeknél a fellépő holtidő veszteség következtében alulbecsüli, addig az új módszer által szolgáltatott értékek megfelelnek az elméleti jóslatokkal. Emiatt ez a módszer a hagyományos eljárás életképes alternatívája. [P10, P11]

5. tézispont. A neutronmultiplicitás-számlálás 1. és 2. tézispontban leírt új módszerének a gyakorlatban történő demonstrációja céljából megterveztem és kielemeztem egy mérést. A mérési összeállítás egyebek mellett négy termikus hasadási kamrát és egy spontán hasadó ^{252}Cf mintát tartalmazott. Monte Carlo szimulációkat végeztem, hogy megtaláljam azt az elrendezést, amelyik a legmagasabb detektálási rátát nyújtja. A detektorok mért jeleit a 3. tézispontban ismertetett eljárással elemeztem, hogy megbecsüljem a szinglet és dublet rátákat; a mérési összeállítás alacsony detektálási határfoka, valamint az adatgyűjtő rendszer hardveres korlátai miatt a triplet rátát nem lehetett meghatározni. Ugyanebből a mérésből referencia ráták kerültek meghatározásra egycsatornás analizátorok és a hagyományos impulzusszámlálás-alapú megközelítés használatával. A kétféle értéket összehasonlítva megmutattam, hogy a hasadási kamra belső alfa-háttére által generált impulzusok miatt a folytonos jelek elemzésével kapott szinglet ráta enyhén felülbecsüli a referenciaértéket. A dublet ráták esetében ugyanakkor az értékek egyezősége kielégítő. [P5, P6, P7, P9, P10, P11]

5. Irodalmi hivatkozások listája

- [Langner, 1998] D. G. Langner, J. E. Stewart, M. M. Pickrell, M. S. Krick, N. Ensslin, and W. C. Harker. “Application guide to neutron multiplicity counting”. No. LA-13422-M. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 1998.
- [Croft, 2012] S. Croft and A. Favalli. “Dead time corrections for neutron multiplicity counting”. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 686 (2012): 115-116.
- [Reilly, 1991] D. Reilly, N. Ensslin, H. Smith Jr, and S. Kreiner. “Passive nondestructive assay of nuclear materials”. No. NUREG/CR-5550. Nuclear Regulatory Commission, 1991.
- [Henzlova, 2015] D. Henzlova, R. Kouzes, R. McElroy, P. Peerani, M. Aspinall, K. Baird, A. Bakel et al. “Current status of helium-3 alternative technologies for nuclear safeguards”. No. LA-UR-15-21201. Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 2015.
- [Pál, 2014] L. Pál, I. Pázsit, and Zs. Elter. “Comments on the stochastic characteristics of fission chamber signals”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 763 (2014): 44-52.

6. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

A disszertációban ismertetett munka az alábbi közleményeken alapszik:

- [P1] I. Pázsit, L. Pál, and L. Nagy. “Multiplicity counting from fission chamber signals in the current mode”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **839** (2016): 92-101.
- [P2] L. Nagy, I. Pázsit and L. Pál, “An extended theory of multiplicity counting from fission chamber signals in the current mode”. In: *International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering*, Jeju, Korea, April 16–20, 2017.
- [P3] L. Nagy, I. Pázsit and L. Pál. “Multiplicity counting from fission detector signals with time delay effects”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **884** (2018): 119-127.
- [P4] L. Nagy, I. Pázsit and L. Pál. “Two- and three-point (in time) statistics of fission chamber signals for multiplicity counting with thermal neutrons”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **929** (2019): 148-155.
- [P5] L. Nagy, I. Pázsit, L. Pál, G. Klujber and M. Szieberth, “Multiplicity counting using the two- and three point statistics of fission chamber signals – theory and experimental demonstration”. In: *International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering*, Portland, Oregon, USA, August 25–29, 2019.
- [P6] L. Nagy, I. Pázsit, L. Pál, G. Klujber and M. Szieberth, “Measurements and simulations to investigate the feasibility of neutron multiplicity counting in the current mode of fission chambers”. *EPJ Web of Conferences*. Vol. 225. EDP Sciences, 2020.
- [P7] L. Nagy, G. Klujber, I. Pázsit, I. Barth, Y. Kitamura, T. Misawa and M. Szieberth, “Experimental Demonstration of Neutron Multiplicity Counting in the Current Mode of Fission Chambers”. *INMM 61st Annual Meeting*, (Online), July 12–16, 2020.
- [P8] L. Nagy, Y. Kitamura, I. Pázsit and M. Szieberth, “New Paradigm in Neutron Fluctuation Analysis: Extracting the Statistics of Discrete Detection Events from Time-resolved Signals of Fission Chambers”. In: *International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering*, Raleigh, North Carolina, USA, October 3–7, 2021. (submitted).
- [P9] M. Szieberth, L. Nagy, G. Klujber, Y. Kitamura, T. Misawa, I. Barth and I. Pázsit, “Experimental Demonstration of Neutron Fluctuation Analysis Based on the Continuous Signal of Fission Chambers: Neutron Multiplicity and Reactor Noise Measurements”. In: *International Conference on Mathematics and Computational*

Methods Applied to Nuclear Science and Engineering, Raleigh, North Carolina, USA, October 3–7, 2021. (submitted).

- [P10] L. Nagy, G. Klujber, Y. Kitamura, T. Misawa, I. Barth, I. Pázsit and M. Szi-
eberth. “Computational Investigation and Experimental Verification of Multiplicity
Counting from the Continuous Signals of Fission Chambers”. *Nuclear Instruments
and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors
and Associated Equipment*. (to be submitted)
- [P11] L. Nagy, G. Klujber, Y. Kitamura, T. Misawa, I. Barth, I. Pázsit and M. Szi-
eberth, “A Computational and Experimental Investigation of Multiplicity Count-
ing with Continuous Fission Chamber Signals”. *INMM and ESARDA Joint Annual
Meeting*, (Online), August 21–26, 2021. (to be submitted)