



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Villamos Energetika Tanszék

Szirtes Máté

**Wavelet transzformáció alkalmazási  
lehetőségei részleges kisülések  
elsugárzott elektromágneses jeleinek  
szűrésére**

KONZULENS

**Cselkó Richárd**

BUDAPEST, 2019

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló .....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>4</b>
<b>1 Bevezetés, motiváció .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Elméleti áttekintés.....</b>	<b>8</b>
2.1 A helymeghatározás matematikai problémája .....	8
2.2 A TDOA értékek meghatározási lehetőségei.....	9
2.2.1 Zaj küszöbözés (#1 módszer) .....	10
2.2.2 Pillanatnyi jelenergia (#2 módszer) .....	10
2.2.3 Energia ablakozás (#3 módszer) .....	10
2.2.4 Kumulatív energia görbe (#4 módszer) .....	11
2.2.5 Keresztkorrelációs függvény (#5 módszer) .....	11
2.2.6 Koherencia függvény inverz Fourier-transzformáltja (#6 módszer) .....	12
2.2.7 Saját módszer – lokális szélsőérték keresés (#7 módszer) .....	12
2.3 A Wavelet-transzformáció .....	13
2.3.1 Folytonos Wavelet-transzformáció.....	13
2.3.2 Diszkrét Wavelet-transzformáció .....	16
<b>3 Az optimális wavelet szűrő meghatározása .....</b>	<b>18</b>
3.1 Vizsgálati módszertan.....	18
3.2 Mérési adathalmaz feldolgozása .....	21
<b>4 Konklúzió.....</b>	<b>31</b>
4.1 Eredmények értékelése .....	31
4.2 Ipari felhasználhatóság, jövőbeli tervek .....	31
<b>Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>33</b>
<b>Ábrajegyzék.....</b>	<b>34</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>35</b>

# Összefoglaló

Napjainkban a nagyfeszültségű berendezések diagnosztikai vizsgálataiban során hangsúlyos szerepet kap a részkisülésvizsgálat, hisz a kisülések időben történő detektálásával megelőzhetők a későbbi költséges meghibásodások. A részkisülések érzékelésére, vizsgálatára kipróbált, szabványosított módszerek állnak rendelkezésre, azonban a térbeli helyzetük meghatározására nincs általánosan elfogadott és szabványosított technika. Egy ilyen célra kialakított rendszerrel jelentősen felgyorsítható a hibák megtalálásának folyamata, azonban ennek hatékony és pontos működéséhez elengedhetetlen a feldolgozott jelek megfelelő szűrése.

A dolgozatot is magába foglaló kutatás céljaként kitűzött mérőrendszer a keresett részkisülés elsugárzott elektromágneses jeleinek antennás mérésére és feldolgozására épül. Ezek a jelek általában erősen zajjal terhelték, melynek szűrésére a hagyományos, Fourier transzformációra épülő szűrők nem elég hatékonyak. Ennek oka, hogy az antennával mért jelalak frekvenciatartalma a tranziens legelején jelentősen eltér annak további, időben hosszabb szakaszától, ez a hosszabb szakasz pedig frekvenciatartományban elnyomja a szakasz elején megjelenő komponenst. Mivel a részleges kisülések helymeghatározásához a mért jelalak legeleje a legfontosabb, így olyan zajszűrő módszert kell találni, ami képes a jel időben változó frekvenciatartalmát, valamint jellegzetes alakjellemzőit is figyelembe venni.

A kutatás aktuális fázisában az ebből a szempontból ígéretes Wavelet transzformáció alkalmazási lehetőségeit vizsgálom, melynek során különféle Wavelet szűrők hatékonyságát tesztelem valós kisülési jelek beérkezési idejének meghatározása szempontjából.

## **Abstract**

Nowadays, partial discharge measurement is of great importance in the diagnostic examinations of high-voltage equipment, because detecting the discharges in time can prevent future costly failures. Standardized methods for the detection and examination of partial discharges are available, but there is no generally accepted and standardized technique for determining their spatial position. A system designed for this purpose can significantly speed up the process of finding errors, but proper filtering of the processed signals is essential for its efficient and accurate operation.

The goal of the research including this study, is to measure and process the emitted electromagnetic signals of the searched partial discharge. These signals usually contain large amounts of additive noise, and traditional Fourier Transform based filters are not efficient enough to filter them. This is because the frequency content of the antenna measured signal significantly differs at the very beginning of the transient, compared to its further longer tail, which suppresses the frequency components of the beginning pulse. Since the most important part of partial discharge location approximation is the very beginning of the measured waveform, a noise reduction method must be developed that can take into account the time-varying frequency content of the signal as well as its characteristic shape features.

In the current phase of the research, I investigate the potential applications of the promising Wavelet transformation, during which I test the efficiency of various Wavelet filters in determining the arrival times of measured partial discharge signals.

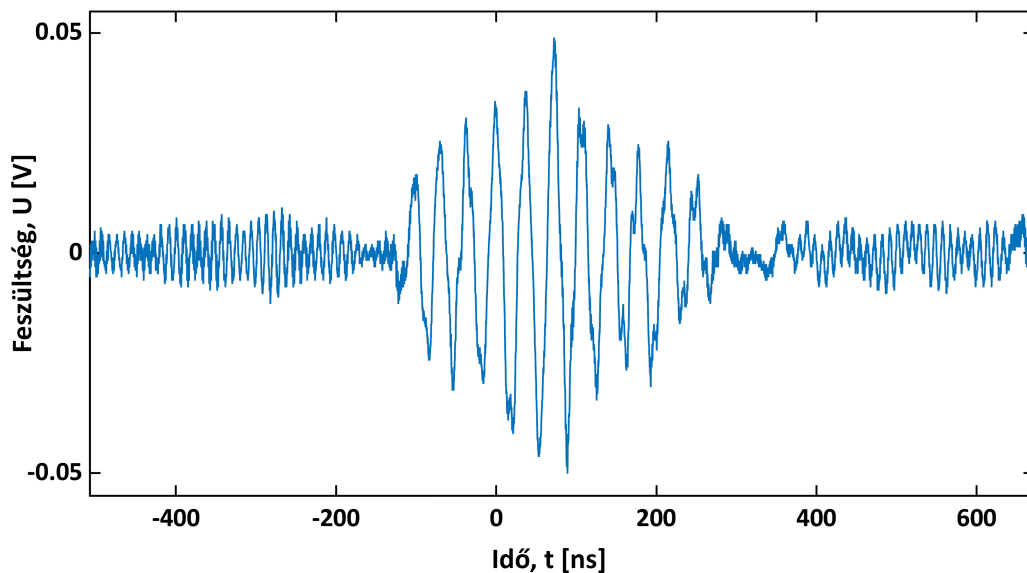
# 1 Bevezetés, motiváció

A 21. század modern, technológiailag fejlett társadalma kritikus mértékben függ a villamosenergia-ellátás megbízható működésétől. A gazdaság közel összes szintjének alapvető működési feltétele a villamos energia folyamatos rendelkezésre állása. Az ellátás esetleges kimaradása az áramszolgáltató számára kieső fogyasztókat, így bevételcsökkenést jelent. Az ellátás kiesése rontja annak stabilitási mutatóit, melyek egy kritikus szintet átlépve komoly pénzbírságot jelenthetnek a szolgáltató számára. Egy ilyen kimaradás megbéníthatja az ipari szektor érintett szereplőit is, kieső termelést, ezzel pedig jelentős anyagi károkat okozva. A kiesés idejére ugyanígy munkaképtelenné válhat minden olyan lakossági személy is, aki munkája során elektronikus eszközöket használ, ez pedig az elvégzendő feladatok szünetelésén keresztül ronthatja a munkáltató pénzügyi helyzetét is.

A villamosenergia-rendszer megbízhatóságában kulcsfontosságú szerepe van az erőműveket, az átviteli- és az elosztó hálózatot, illetve a fogyasztókat összekötő transzformátoroknak. Ezek a berendezések képezik a villamos hálózat gráfjában a csomópontokat, így esetleges meghibásodásaik a hálózat hurkoltságát, ezen keresztül pedig az energiaellátás megbízhatóságát veszélyeztethetik. A transzformátorok nagyfeszültségű egységeinek meghibásodását sok esetben részleges kisülések (részletörés, részkisülés, partial discharge, PD) előzik meg. Ezek olyan villamos kisülések, melyek nem terjednek elektródtól elektródig, csupán lokálisan vannak jelen az elektródköz azon térrészében, ahol a villamos tér inhomogenitása miatt a térerősség meghalad egy bizonyos határértéket. Ezek a kisülések fokozatosan degradálják az adott szigetelőanyagot, csökkentve ezzel a teljes szigetelési rendszer szigetelőképességét, mely végül átütéshez, átíveléshez vezet. Egy ilyen meghibásodás a berendezés tönkremenetelén túl veszélyt jelent a környező berendezésekre és kezelőszemélyzetre is. Az így okozott, fent felsorolt gazdasági károkhoz hozzáadódik a meghibásodott berendezés pénz-, munkaerő- és időigényes javítása, illetve cseréje is.

Sok komoly meghibásodás megelőzhető az azt megelőző részkisülés időben történő detektálásával, és helyzetének ismeretében az okozó hiba javításával. A részkisülés-mérések során általánosan alkalmazott, szabványosított konvencionális módszer csupán a kisülés detektálására képes, míg annak fizikai pozíciójáról nem

szolgáltat információt. [1] A PD helyzetének pontos meghatározására jelenleg csupán olyan kísérleti módszerek léteznek, melyeket az irodalom már vizsgál, viszont nincsenek általánosan alkalmazva a részkisülések diagnosztikájában. Ezek a kisülések egyaránt keltenek vezetett elektromos, hang útján terjedő mechanikai, illetve sugárzott elektromágneses zavarokat, melyek mérését alapul véve különféle kísérleti technikák léteznek a kisülés helyzetének meghatározására. A kutatás előző szakaszában az elektromágneses jelek mérésén alapuló módszerek tanulmányozását követően megépítésre és tesztelésre került egy olyan mérőrendszer prototípusa, melynek segítségével becslés adható a részkisülés koordinátáira egy rögzített koordináta-rendszerben. [2]



1. ábra: A dolgozatban vizsgált részkisülésforrás antennával mért jele

A helymeghatározás pontosságához elengedhetetlen az 1. ábra feszültségjeléhez hasonló zajjal terhelt jelek közötti beérkezési időkülönbségek (time difference of arrival, TDOA) megfelelő pontosságú meghatározása. Ehhez azonban a jeleknek megfelelő zajszűrésen kell átesniük a további feldolgozás előtt. A kutatás előző fázisában erre a célra Fourier-transzformáció alapú digitális aluláteresztő szűrőt alkalmaztam. Ez a módszer azonban nehezen alkalmazható általánosan, ugyanis a szűrés előtt meg kell vizsgálni a hasznos jel domináns frekvenciasávját, ezt pedig bonyolultsága miatt manuálisan lehet megbízhatóan meghatározni, továbbá ha a domináns frekvenciasávra túl alacsony érték adódik, a jel lassú változása miatt pontatlanabb lesz a beérkezési idők meghatározása. Ez a digitális szűrőtípus továbbá nem veszi figyelembe a kisülés feszültségjelének speciális időtartománybeli jellemzőit, hanem kizárólag a

frekvenciatartománybeli viselkedésre támaszkodik. Míg a TDOA értékek meghatározásához a hasznos jel első impulzusa a legfontosabb, addig a frekvenciatartománybeli viselkedést, ezen keresztül pedig a frekvenciatartománybeli szűrést is a rendszer oszcilláló válasza fogja dominánsan meghatározni, elnyomva az első impulzus hatását.

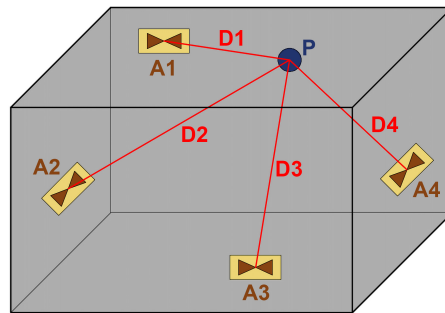
A frekvenciatartományban definiált szűrés ezen gyengeségeire nyújt megoldást a Wavelet-transzformációra épülő szűrés, amely figyelembe veszi a jel időtartománybeli jellemzőit, valamint időben korlátozott voltát. Míg a Fourier-transzformációnak gyakorlatilag nincsenek állítható paraméterei, addig a Wavelet-transzformáció esetén az úgynevezett wavelet függvény megfelelő kiválasztásával a szűrési folyamat az adott jel egyedi jellemzőire szabható. A dolgozat célja a megfelelő wavelet függvény kiválasztása, melynek használatával a Wavelet-transzformáció általánosan alkalmazhatóvá válhat a részkisülések helymeghatározási folyamatában.

A dolgozat első szakasza a kutatás elméleti háttérét alapozza meg a helymeghatározási probléma, a különféle TDOA meghatározó módszerek, valamint a Wavelet-transzformáció általános ismertetésével. A középső szakasz leírja a mérések és vizsgálatok menetét, valamint bemutatja a mért adathalmaz feldolgozásának procedúráját a megfelelő paraméterek kiválasztásához. A következő szakasz a kiválasztott paramétereket alkalmazó wavelet szűrőt hasonlítja össze a hagyományos, frekvenciatartományban definiált szűrővel, majd a dolgozatot a levont következtetések összefoglalása és a jövőbeli ipari alkalmazást célul kitűző fejlesztési tervek ismertetése zárja.

## 2 Elméleti áttekintés

### 2.1 A helymeghatározás matematikai problémája

A térben fizikailag rögzített koordináta-rendszer felállítása után az antennák (A) háromdimenziós koordinátáit ismertnek, a részkisülés (P) három koordinátáját pedig ismeretlennek tekintjük. A helymeghatározás azon alapszik, hogy az egyes antennák és a jelforrás közötti távolságok (D) ismeretében meghatározható a részkisülés helyzete is. A helymeghatározási probléma modelljét szemlélteti a 2. ábra. Egy mérés során a vett jelekből kinyerhető, számunkra hasznos információ a jelek beérkezési között eltelt idő (TDOA). Fontos megjegyezni, hogy a forrás és a szenzor közti távolság megállapításához a két pont közti jelterjedési idő (time of flight, TOF) ismeretére lenne szükség, nekünk viszont csak ezen idők különbségei állnak rendelkezésünkre.



2. ábra: A helymeghatározási probléma térbeli modellje

A probléma megoldásához kiválasztunk egy referencia antennát, melyet 1-es indexszel jelölünk, és az antennához tartozó TOF értéket bevezetjük ismeretlenként. A további antennákhoz úgy definiáljuk az előjeles TDOA értékeket, hogy az megmutatja, hogy a referenciához képest mennyivel később érkezett az elsugárzott elektromágneses jel az adott antennához. Ezek alapján az antennákhoz tartozó TOF értékek előállnak ezen ismeretlen TOF és az adott előjeles TDOA összegeként. Ezt követően a részkisüléstől számított távolság antennánként felírható egyenlete a jelterjedési sebesség és a TOF szorzatából adódik, ahogy azt (1) egyenletei is mutatják. [3]

A megoldandó egyenletrendszer azért négyelemű, mert a referencia TOF ismeretlenként történő bevezetésével ismeretlenjeink száma négyre nőtt, így az egyenletrendszer megoldásához legalább 4 egyenletre van szükség. Ebből az is következik, hogy az egyenletek felírásához 4 jelre, ezek rögzítéséhez pedig 4 antennára



van szükség. Az egyenletekből látható, hogy az antennák koordinátáinak pontos ismerete esetén a helymeghatározás pontosságát kizárólag a TDOA értékek pontossága határozza meg, így látható, hogy a dolgozat céljául megfogalmazott zajszűrés központi fontossággal bír a helymeghatározási folyamat során.

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} = c \cdot T_1 & (1) \\
 D_2 &= \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} = c \cdot (T_1 + T_{12}) \\
 D_3 &= \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} = c \cdot (T_1 + T_{13}) \\
 D_4 &= \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2} = c \cdot (T_1 + T_{14}) \\
 & \left( c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)
 \end{aligned}$$

Ahol:

- $D_i$ : az  $i$ -edik antenna és a jelforrás távolsága [m]
- $(x, y, z)$ : a jelforrás koordinátái [m]
- $(x_i, y_i, z_i)$ : az  $i$ -edik antenna koordinátái [m]
- $c$ : az elektromágneses jelek terjedési sebessége levegőben [m/s]
- $T_1$ : a referencia antenna ismeretlen TOF értéke [s]
- $T_{1n}$ : az  $n$ -edik antenna és a referencia közötti előjeles TDOA érték [s]

## 2.2 A TDOA értékek meghatározási lehetőségei

A TDOA értékek meghatározására az irodalomban többféle módszer létezik, melyek két fő csoportba sorolhatók. Az első csoport technikái a beérkező jel kezdetének időpontját igyekeznek megtalálni, majd ezek különbségeként határozzák meg a TDOA értékét. A második csoport az úgynevezett keresztkorrelációs függvényt használja a TDOA értékek közvetlen meghatározására. Az alábbi alfejezetekben ezen módszereket mutatom be az irodalomban alkalmazott formájukban, a listát pedig egy saját fejlesztésű módszerrel zárom. A bemutatott módszereket a további egyszerűbb kezelhetőség érdekében sorszámmal látom el őket, és a későbbiekben így hivatkozok rájuk.

Az első három módszer úgynevezett küszöböző eljárást alkalmaz, melyhez első lépésként egy küszöbérték meghatározására van szükség. Ezek a módszerek a jel kezdetét a küszöbérték első elérésével definiálják.

Mivel a valóságban mintavételezéssel kapott diszkrét jelekkel dolgozunk, így az alábbi módszereknél a „ $k$ ” diszkrét mintaszámot használom a folytonos „ $t$ ” idő helyett, a

vizsgált feszültségjel  $k$ -adik rögzített értékét pedig ennek megfelelően „ $x[k]$ ” formában jelölöm.

### 2.2.1 Zaj küszöbözés (#1 módszer)

Ez a módszer a rögzített jelet megelőző zaj szintjét vizsgálja, majd a küszöbértéket a maximális zajszint 110 százalékaként definiálja. [4] A megelőző zaj vizsgálhatóságához az oszcilloszkópon úgy célszerű beállítani a triggerelés időpontját, hogy a beérkező jel egyértelműen a rögzített jel második felébe essen. Ilyen megfontolás mellett a zaj vizsgálatánál a rögzített jel első felét kell figyelembe venni.

### 2.2.2 Pillanatnyi jelenergia (#2 módszer)

Ez a módszer a (2) alapján számított pillanatnyi jelenergiát vizsgálja, melynek során a küszöbértéket a maximális jelenergia 10 százalékaként definiálja. [5] Ahogy az összefüggés is mutatja, ebben az esetben a jelenergiát úgy kapjuk, hogy a diszkrét feszültségértékeket négyzetre emeljük.

$$E_{\text{pill}}[k] = x[k]^2 \quad (2)$$

A módszer maximumkeresése azon a feltevésen alapszik, hogy a jel első impulzusa lesz a legnagyobb, a további oszcillációk pedig csökkenő jelleget mutatnak, ugyanis csak ilyen módon szolgáltatja eredményül a beérkező jel kezdetét. Ennek tudatában, az 1. ábra jelalakjának növekvő majd csökkenő jellege alapján ez a módszer várhatóan bizonytalan eredményt fog szolgáltatni, ugyanis nem garantált, hogy a küszöbérték keresésével az első impulzust találjuk meg.

### 2.2.3 Energia ablakozás (#3 módszer)

Az energia ablakozó módszer egy 20 ns széles ablakot csúsztat végig az időtengelyen mintapontonként, és minden lépésnél az ablakba eső feszültségértékek négyzetösszegét számítva adja az ablakozott jelenergia függvényét, ahogy azt (3) is mutatja. [6] A dolgozatban vizsgált jeleknél a mintavételi idő 0,2 ns, így a 20 ns széles ablak 100 mintapontnak felel meg.

$$E_{\text{ablak}}[k] = \sum_{k_0=0}^{99} x[k + k_0]^2 \quad (3)$$

A küszöbérték ebben az esetben is a függvény maximumának 10 százalékaként lett definiálva, ebben az esetben viszont a széles ablak kisimítja a vizsgált jel oszcillációit egyetlen lassú impulzussá, így ebben az esetben ígéretesebb a maximumkeresést alkalmazó küszöb használata. Ennél a módszernél a simított jelalak lassú változása vihet pontatlanságot az időkülönbségek meghatározásába.

#### 2.2.4 Kumulatív energia görbe (#4 módszer)

A módszer az úgynevezett kumulatív energia görbe minimumának elérését tekinti a jel kezdetének. [7] A görbét (4) definiálja, ahol „N” jelöli a diszkrét „x” jel adatpontjainak számát, „S<sub>i</sub>” pedig a jel kumulatív energiáját az i-edik mintapontban. A görbe definíciójából látható, hogy amíg a nagy jelenergiájú hasznos jel helyett csak a zajt vizsgáljuk, addig az adott időponthoz tartozó kumulatív energia értéke kisebb, mint a teljes kumulatív energiának arra az időpontra eső arányos része. Ez azt eredményezi, hogy a görbe egészen a hasznos jel kezdetéig csökkenő jelleget mutat, majd annak jelenlétében nőni kezd, a hasznos jel vége utáni zaj esetén pedig ismét csökken egészen nulláig. Ebből következik, hogy a görbe minimumhelye jól közelíti a hasznos jel kezdeti idejét.

$$S[i] = S_i - i \cdot \frac{S_N}{N} \quad (4)$$

$$\left( S_i = \sum_{k=1}^i x[k]^2 ; i = 1, 2, 3, \dots, N \right)$$

#### 2.2.5 Keresztkorrelációs függvény (#5 módszer)

A keresztkorrelációs függvény két jel hasonlóságát mutatja meg az egymáshoz viszonyított időbeli eltolás függvényében. [4] [5] A függvény definícióját „x<sub>1</sub>” és „x<sub>2</sub>” jelekre (5) mutatja, ahol a két jel „r<sub>x<sub>1</sub>x<sub>2</sub></sub>” keresztkorrelációs függvényét a 2-es jel előjeles „τ” mértékű balra tolásán keresztül kapjuk. Az egyenletekben „N” a diszkrét jel adatpontjainak számát jelöli. Egy jel önmagával vett keresztkorrelációját autokorrelációnak nevezzük.

$$r_{x_1x_2}[\tau] = \begin{cases} \sum_{k=1}^{N-\tau} \{ x_1[k] \cdot x_2[k + \tau] \}, & \text{ha } \tau \geq 0 \\ \sum_{k=1-\tau}^N \{ x_1[k] \cdot x_2[k + \tau] \}, & \text{ha } \tau < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$(\tau = -(N-1), \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, (N-1))$$

Jól látható, hogy amennyiben a 2-es jelet az „x<sub>1</sub>” jelhez viszonyított előjeles késéseként definiált TDOA értékkel balra toljuk, a két összeszorozott jel ideális esetben azonos lesz, így a keresztkorrelációs függvény ekkora eltolás esetén veszi fel a maximális

értékét. Ebből tehát az következik, hogy a keresztkorrelációs függvény maximum helyének meghatározása a TDOA kiszámításával egyenértékű feladat.

Ennek a módszernek a gyenge pontja abban rejlik, hogy a fent leírtak tökéletesen azonos alakú jelekre vonatkoznak, melyek között csupán időbeli eltolás áll fenn. A gyakorlatban viszont, bár azonos a jelforrás, a két antenna által szolgáltatott jelalak nem lesz tökéletesen azonos, ami hibát visz a keresztkorrelációs függvénybe és akár hamis maximumokat is eredményezhet. Ez például úgy fordulhat elő, ha a függvény a két jel oszcilláló tranziensét hibás fázishelyzetben illeszti egymásra.

### 2.2.6 Koherencia függvény inverz Fourier-transzformáltja (#6 módszer)

A keresztkorrelációs függvényre nyújt alternatívát a frekvenciatartományban értelmezett koherencia függvény inverz Fourier-transzformáltja. [8] Ennek számítási módját mutatja (6), ahol „ $\gamma_{x1x2}$ ” az „ $x1$ ” és „ $x2$ ” jelek közötti koherencia, „ $G$ ” pedig indextől függően a kereszt- vagy az autokorrelációs függvény Fourier-transzformáltja. Az egyenletben „ $F\{\cdot\}$ ” a diszkrét jel gyors Fourier-transzformációját (Fast Fourier-Transform, FFT) jelöli. A keresztkorrelációs függvény Fourier-transzformáltját kereszt teljesítmény spektrumnak, az autokorrelációs függvényét pedig teljesítménysűrűség spektrumnak nevezzük. A teljesítménysűrűség spektrum valós értékeket vesz fel, így értelmezhető annak gyöke is.

$$\gamma_{x1x2}(f) = \frac{G_{x1x2}(f)}{\sqrt{G_{x1x1}(f) \cdot G_{x2x2}(f)}} \quad (6)$$

$$(G_{xaxb}(f) = F\{r_{xaxb}[\tau]\}; \quad a, b \in \{1; 2\})$$

A koherencia függvény inverz Fourier-transzformáltja a keresztkorrelációs függvénnyel azonos értelmezésű függvényt eredményez, tehát ez a módszer is maximum hely keresésre vezet vissza a TDOA érték meghatározását. Tekintve, hogy ez a módszer a keresztkorrelációs függvényből lett származtatva, így ugyanazokat a hibalehetőségeket hordozza magában. A transzformációs eljárás ideális jelek esetén javítja a pontosságot, valós jelek esetén viszont bonyolultsága miatt nehéz előzetes becslést adni a módszer végső pontosságára.

### 2.2.7 Saját módszer – lokális szélsőérték keresés (#7 módszer)

Ez a saját fejlesztésű módszer arra a feltételezésre épül, miszerint a rögzített részkisülés jelalak első impulzusa tartozik magához a kisüléshez, az ezt követő oszcilláló

tranzienst pedig csupán a mérőrendszer válasza erre az impulzusra. Ennek tudatában a jel kezdetének meghatározását a módszer az első impulzus csúcsának megtalálására vezeti vissza. Az algoritmus a jel első jelentősebb lokális szélsőértékét keresi, ezért a módszer igen érzékeny a valódi szélsőérték körül jelentkező additív zaj torzító hatására. A módszer működéséhez tehát elengedhetetlen a megfelelő előzetes zajszűrés, melynek következtében a kisimított jelen már nagy pontossággal megtalálható a keresett lokális csúcs.

## 2.3 A Wavelet-transzformáció

### 2.3.1 Folytonos Wavelet-transzformáció

A Wavelet-transzformáció működésének és előnyeinek megértéséhez először tekintsük át annak folytonos változatát (Continuous Wavelet-Transform, CWT). A CWT központi eleme az időtartományban értelmezett wavelet függvény, más néven anya wavelet (mother wavelet), melyet jellemzően a psi görög betűvel ( $\Psi$ ) szokás jelölni. A wavelet függvényeket hasonló tulajdonságaik alapján családokba soroljuk, melyen belül a waveleteket a rendszámuk alapján azonosíthatjuk. [9] [10] Nagy számuk és változatos megjelenésük ellenére minden wavelet függvénynek teljesítenie kell három alapvető tulajdonságot. [6] Az első tulajdonság (7) alapján azt jelenti, hogy a függvény középértéke mindig nulla, tehát a waveletnek nem lehet DC komponense. A waveletek ennek megfelelően mindig adott középfrekvenciájú oszcillációt végeznek.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (7)$$

A waveletek második általános tulajdonságát (8) írja le, miszerint a függvény jelenergiájának mindig egységnyinek kell lennie. Ennek megfelelően az anya wavelet transzformációja során a jelenergiát mindig 1-re kell normálni.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt = 1 \quad (8)$$

A waveletek harmadik tulajdonsága, hogy időben lokalizáltak, tehát csak egy véges időablakban rendelkeznek 0-tól eltérő értékekkel. Ez a tulajdonság teszi lehetővé a jelek időbeli változásainak megfelelő lekövetését a szűrési folyamat során.

A CWT során az anya waveletet időtartományban transzformáljuk az „a” skálázási és a „b” eltolási paraméterekkel, ahogy (9) mutatja. [11] Míg a függvényt az eltolási paraméterrel az időtengelyen tudjuk csúsztatni, addig a skálázási paraméterrel az

időtengely mentén nyújthatjuk vagy zsugoríthatjuk, melynek következtében a wavelet középfrekvenciája is módosul, tehát a frekvenciatartományban is csúsztatjuk a jelet. Az egyenletben a skálázási tényező gyökével való osztás biztosítja az egységnyi jelenergia megtartását.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (9)$$

Az időtartománybeli „x(t)” jel folytonos Wavelet-transzformáltjának számítási módját (10) írja le. [11] A wavelet függvényre adott „a” paraméter mellett egy sáváteresztő szűrő impulzusválaszaként is tekinthetünk, ebben az olvasatban pedig a Wavelet-transzformáció a „b” paraméter csúsztatásával gyakorlatilag a vizsgált jelnek és ennek az impulzusválasznak a konvolúcióját adja. Az így eredményül kapott „W<sub>x</sub>(a,b)” wavelet koefficiensek az idő-frekvencia sík egy-egy pontjához rendelnek értéket, ahol az időtartománybeli pozíciót „b” adja meg, a frekvenciatartománybeli pozíciót pedig az „ $\omega=1/a$ ” középfrekvencia. A konvolúciók eredményeként adódó, adott középfrekvenciájú sávszűrésen átesett időtartománybeli jeleket az idő-frekvencia síkról az időtengellyel párhuzamosan haladva olvashatjuk le, míg a frekvenciatengellyel párhuzamosan haladva az adott időszakaszhoz tartozó frekvenciatartománybeli képet kapjuk.

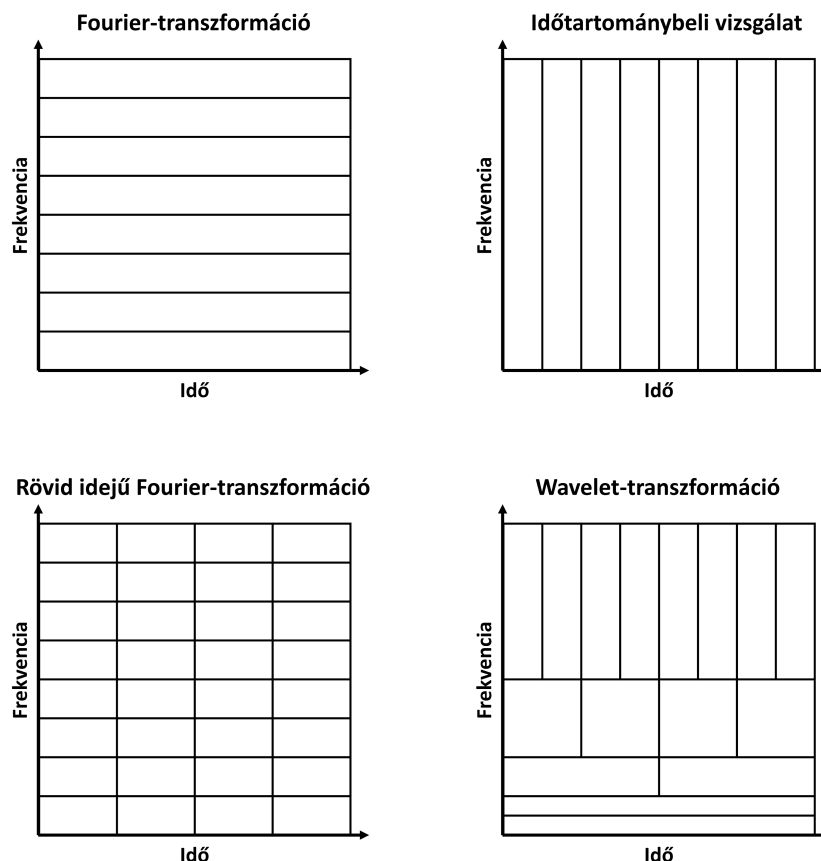
$$W_x(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} \{x(t) \cdot \Psi_{a,b}(t)\} dt \quad (10)$$

A „ $\Psi_{a,b}(t)$ ” függvényt idő-frekvencia atomnak is szokás nevezni, mivel a skálázási tényezőt növelve a jel időtartománybeli felbontóképessége csökken, frekvenciatartománybeli felbontóképessége viszont nő. Ez azzal magyarázható, hogy akár idő-, akár frekvencia tartományt vizsgálunk, annál jobb a felbontóképesség, minél keskenyebb a vizsgáló csúsztatott ablak, a skálázás növelésével pedig a jel kiterjedése az időtartományban nő, a frekvenciatartományban pedig arányosan csökken a középfrekvencia csökkenése miatt. A frekvenciatartománybeli kiterjedés csökkenése azzal magyarázható, hogy minél lassabb a jel változása, spektruma annál jobban közelít a vonalashoz, gyorsan változó aperiodikus jelek esetén pedig a vonalak körül kiszélesedik a spektrum.

A fentiekből látszik, hogy nem érhető el egyszerre jó idő- és frekvenciatartománybeli felbontás, viszont a Wavelet-transzformáció esetén az idő-frekvencia atom paramétereinek változtatásával beállítható a számunkra ideális arány. Ez a tulajdonság jól szemléltethető a 3. ábra idő-frekvencia síkon értelmezett, úgynevezett Heisenberg-dobozaival, ahol egy téglalap egy idő-frekvencia atomot szemléltet, és minél

nagyobb a kiterjedése egy adott dimenzió mentén, annál rosszabb az ottani felbontóképessége.

Az ábrán látható, hogy az időtartománybeli vizsgálatnál nincs frekvenciatartománybeli felbontás, míg a Fourier-transzformációs vizsgálat nem hordoz magában időtartománybeli információt. Erre a hiányosságra nyújt megoldási kísérletet a rövid idejű Fourier-transzformáció (Short Time Fourier-Transform, STFT), amely az időtengelyt ablakokra bontva ablakonként számítja az adott jelszakasz Fourier-transzformáltját. [12] Ennek az egyik gyengesége, hogy minden Heisenberg-doboza egyforma méretű, így például a nagyfrekvenciás tartományban az alacsony időtartománybeli felbontás miatt nem kapunk részletes információt a jel viselkedéséről, ugyanúgy, ahogy az alacsonyfrekvenciás tartományban nem elég nagy a frekvenciatartománybeli felbontás. Másik hátránya az STFT módszernek, hogy bár a jelek vizsgálatára alkalmas, szűrési eljárásokhoz nem használható.



3. ábra: Népszerű transzformációk összehasonlítása Heisenberg-dobozokkal

A Wavelet-transzformáció megoldást nyújt az STFT gyengeségeire, ugyanis a nagyfrekvenciás tartományban a nagy időbeli felbontásnak köszönhetően megfelelően

képes kiemelni a gyors időtartománybeli változásokat, míg a jel alacsonyfrekvenciás komponenseit megfelelő frekvenciatartománybeli felbontással képes elkülöníteni egymástól. Megfigyelhető, hogy csak úgy választhatjuk meg az idő- és frekvenciatartománybeli felbontást, hogy a Heisenberg-dobozok területe közben változatlan marad. A Wavelet transzformáció idő-frekvencia atomjai egy kivétellel mind sávszűrő jellegűek, míg a legalsó, teljes időtartományt átfogó Heisenberg-doboz magába foglalja a jel DC komponensét is. Ehhez a komponenshez az anya wavelet helyett a görög fi betűvel ( $\Phi$ ) jelölt, úgynevezett apa waveletet (father wavelet), vagy másik néven skálafüggvényt alkalmazzuk, melynek van DC komponense és kifejezetten erre a célra lett kifejlesztve.

### 2.3.2 Diszkrét Wavelet-transzformáció

A diszkrét Wavelet-transzformáció (Discrete Wavelet-Transform, DWT) számítási módja megkapható a CWT képleteinek diszkrétizálásával. [11] Ahogy (11) is mutatja, a diszkrét idő-frekvencia atom esetén az eltolás és a skálázás nem független egymástól, ugyanis mindkét paraméter 2 egész számú hatványaival arányos, ahol a kitevőben szereplő „j” paraméter, valamint az eltolással arányos „m” paraméter nemnegatív egész számok.

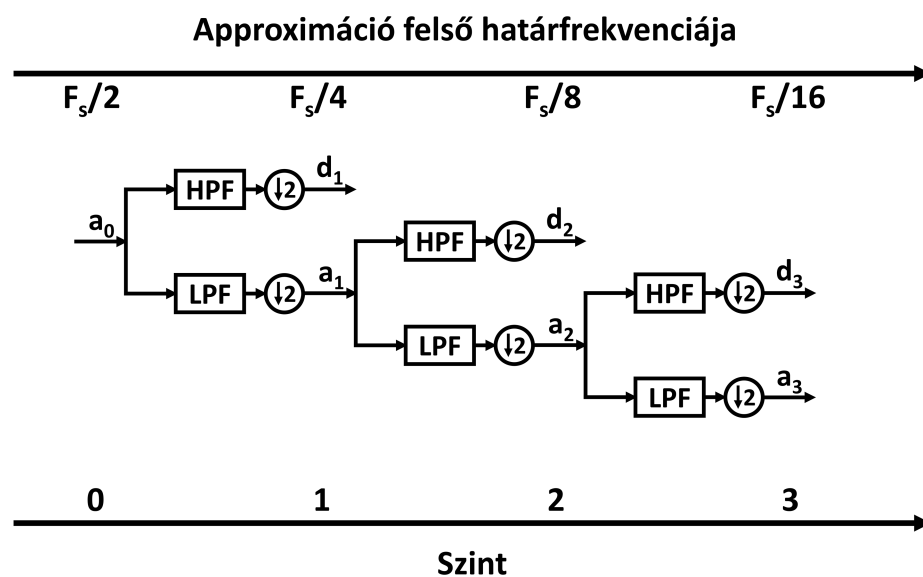
$$\Psi_{2^j, 2^j m}[k] = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \cdot \Psi\left(\frac{k - 2^j m}{2^j}\right) \quad (11)$$

Ebből az következik, hogy DWT esetén a nagyfrekvenciás komponenstől lefelé indulva, minden további vizsgálati szint középfrekvenciája az előzőnek a fele lesz, miközben az időtartománybeli lépésköz a kétszeresére nő. A 3. ábra Heisenberg-dobozai jól szemléltetik ezt a fajta léptetést.

A DWT legelterjedtebb számítási módja az úgynevezett gyors Wavelet-transzformáció (Fast Wavelet-Transform, FWT), ami a diszkrét idő-frekvencia atomokra mint felüláteresztő szűrőkre (wavelet függvény: high pass filter, HPF), illetve aluláteresztő szűrőkre (skála függvény: low pass filter, LPF) tekint, és a 4. ábra dekompozíciós gráfja szerint minden vizsgálati szint (level) esetén ketté szedi a jelet egy kis- és egy nagyfrekvenciás komponensre. A kisfrekvenciás komponenszt approximációnak (approximation, a), a nagyfrekvenciásat pedig részletnek (detail, d) nevezzük, ahol a következő szint az előző szint approximációját kapja bemenetként és azt felezi el frekvenciatartományban. [11] [13] Az ábra approximációinak és részleteinek az



indexe az aktuális vizsgálati szintet jelöli, ahol a nulladik szint az eredeti jel, melynek sávzélessége a mintavételi tétel szerint a mintavételi frekvencia fele ( $F_s/2$ ), míg az n-edik szint approximációja a  $[0; F_s/2^{n+1}]$ , részlete pedig az  $[F_s/2^{n+1}; F_s/2^n]$  frekvenciasávot fedi le. Fontos továbbá kiemelni, hogy minden szűrés után egy alumintavételezés történik, melynek során az „N” adatpontú bemeneti jelből két „N/2” adatpontú jelet generálunk. Erre azért van szükség, hogy a szűrési folyamat kimenetén ne duplázódjon meg a rendelkezésünkre álló adatok száma.



4. ábra: A gyors Wavelet-transzformáció dekompozíciós gráfja

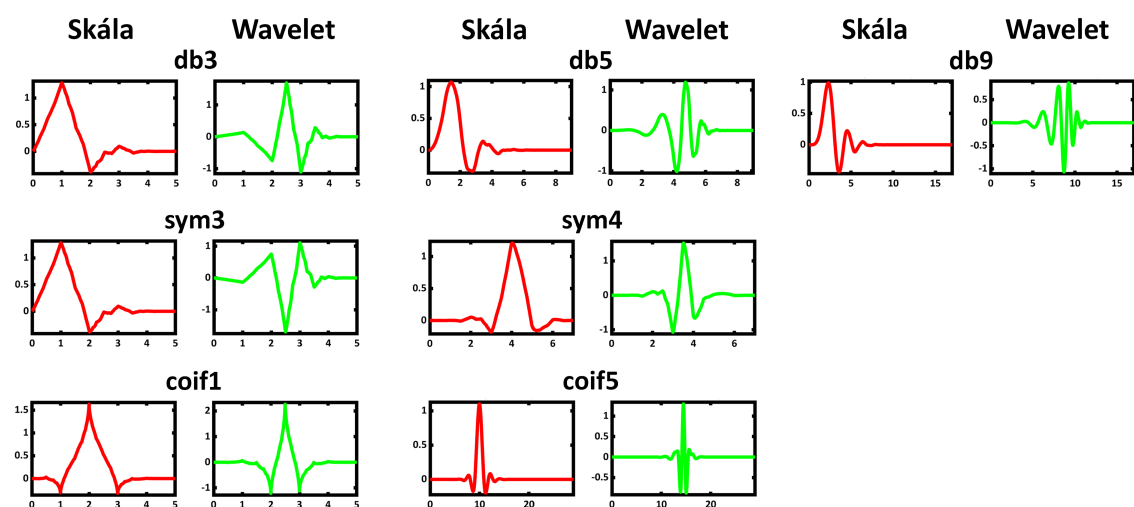
A 4. ábra dekompozíciós gráfjának részlet ( $d_n$ ) kimenetei a DWT kimeneti koefficiensei, míg az approximációk ( $a_n$ ) a DWT zajsűrési eljárásának kimenetei, feltételezve, hogy az additív zajnak a jelnél nagyobb frekvenciájúak a komponensei. A továbbiakban a megfelelő wavelet függvény kiválasztása mellett azt is meg kell állapítani, hogy mely diszkrét dekompozíciós szint approximációja adja a legpontosabb eredményt.

## 3 Az optimális wavelet szűrő meghatározása

### 3.1 Vizsgálati módszertan

Az optimális wavelet szűrő összeállításához meg kell határozni az alkalmazandó wavelet függvény típusát, az FWT alapú zajszűrés dekompozíciós szintjét, valamint az alkalmazandó TDOA meghatározó módszert. Az optimális wavelet függvényenél elvárás az általános működés, így azok a waveletek jöhetnek szóba, melyek dekompozíciós szinttől és TDOA meghatározó módszertől függetlenül pontosabbak és megbízhatóbbak. Ugyanezt a logikát kell alkalmazni az optimális dekompozíciós szint és az optimális TDOA meghatározó módszer kiválasztásánál is. Ebből következik, hogy a három paraméterdimenzió mentén egyenként több módszert is ki kell próbálni, majd a kapott háromdimenziós adathalmazból a fenti megfontolások alapján kell meghatározni az optimális paraméterhármaszt.

A vizsgálandó wavelet családokat a szakirodalom által vizsgált waveletek alapján választottam ki. [9] [11] [12] [14] [15] A választás a Daubechies, a Symlets és a Coiflets wavelet családokra esett. A Daubechies (db) család legelterjedtebben alkalmazott rendszám tartománya 1-től 10-ig, a Symlets (sym) családé pedig 2-től 8-ig, a Coiflets (coif) családé pedig 1-től 5-ig terjed. A megfelelő wavelet keresésekor ezt a 22 típust (db1-10, sym2-8, coif1-5) fogom összehasonlítani, melyek közül a dolgozat későbbi szakaszában a 16. ábra alapján kiválasztott 7 legjobb eredményt adó wavelet típus skálafüggvényeit és wavelet függvényeit az 5. ábra mutatja.



5. ábra: A későbbiekben kiválasztott 7 legjobb eredményt adó wavelet függvényeinek szemléltetése

Fontos kiemelni, hogy a részkisülések jeleit Wavelet-transzformációval szűrő szakirodalmak a megfelelő wavelet kiválasztásakor csak a zajszűrés hatásosságát vizsgálják különféle mérőszámok segítségével, az időkülönbségek meghatározásának hatékonyságát viszont nem veszik figyelembe a végső döntésnél. [9] [10] [12] [14] [15] A szűrés eredménye ezekben az esetekben tehát egy olyan jel lesz, melynek például ideális a jel-zaj viszonya, a belőle számított TDOA értékek pontossága viszont akármekkora lehet. A vizsgált szakirodalommal ellentétben, a dolgozatban megfogalmazott alapelvek szerint a szűrés célja nem az additív zaj tökéletes eliminálása, hanem a rögzített feszültségjel olyan módú időtartománybeli transzformációja, amely a megfelelő időkülönbség meghatározó módszerrel párosítva megbízható és pontos TDOA értékeket szolgáltat.

A dolgozat további szakaszában a felsorolt 22 wavelet típust a Level 1 – Level 7 dekompozíciós szinteken fogom vizsgálni, minden esetben kipróbálva a bemutatott 7 TDOA meghatározó módszert is. A vizsgált paraméterek tere tehát egy  $22 \times 7 \times 7$  elemű háromdimenziós mátrixot eredményez, ami több, mint 1000 lehetséges kombinációja a lehetséges paramétereknek.

A vizsgálatokhoz egy 50 mm elektródtávolságú tű-sík elektródpárra  $26 \text{ kV}_{AC}$  váltakozó feszültséget kapcsolva, a létrejövő koronakisülés elsugárzott elektromágneses jeleit 2 darab negyedhullámhosszú teleszkópos monopól antennával mértem, melyek elméleti középfrekvenciája a beállított hosszukból visszszámolva 120 MHz-nek adódott. Az antennahossz előzetes vizsgálatok alapján úgy lett beállítva, hogy az oszcilloszkóp az antennák pozíciójától függetlenül a lehető legintenzívebb feszültségjeleket rögzítse. Az alkalmazott kisülésforrást és a használt antennák egyikét mutatja be a 6. ábra. Az antennák feszültségjeleit 10 m hosszú, H-155 típusú nagyfrekvenciás koaxiális kábelek juttatták el a digitális oszcilloszkópig (digital sampling oscilloscope, DSO), melynek mintavételi frekvenciája 5 GSa/s, analóg sávszélessége pedig 1 GHz volt. A koaxiális kábelek közötti minimális hosszkülönbség késleltető hatása is le lett mérve, a mért adatok pedig korrigálva lettek a megfelelő jelterjedési időkülönbségekkel.



6. ábra: A vizsgált tű-sík kisülésforrás és az egyik alkalmazott antenna

A vizsgálatok során 3 különböző antenna elrendezést vizsgáltam, elrendezésenként 15 mérést végezve. Ezt követően az adott paraméterhármas alkalmazásával elrendezésenként kiszámítottam a 15 TDOA értéket, majd ezek átlagát képeztem. A kapott átlagos TDOA értéket az elrendezés ismert koordinátái alapján számított ideális időkülönbséggel összevetve kiszámítottam az elrendezés abszolút becslési hibáját. Elrendezésenként kiszámítottam továbbá a 15 számított időkülönbség szórását, mely megmutatja, hogy mennyire megbízható az átlagos eredmény. Az adott paraméterhármashoz tartozó 2 végső vizsgálati eredményt a 3 elrendezés abszolút TDOA hibáinak átlaga, valamint a 3 szórás átlaga adja.

Kiemelendő, hogy az elrendezésen belüli 15 TDOA értéknek az átlaga lett kiszámítva, itt tehát az átlagolás még csökkentheti a végső hibát, a szórás viszont megmutatja, hogy az átlag mennyire képviseli hitelesen az egyes mérési eredményeket. Ezzel szemben a 3 elrendezés eredő eredményeinél már az abszolút TDOA értékeket átlagoltam, így itt a pontosság már nem növekszik, a hiba nagyságáról viszont általánosabb képet kapunk, ugyanúgy, ahogy a szórásról is annak átlagolásával.

## 3.2 Mérési adathalmaz feldolgozása

Az optimális paraméterhármas meghatározásához egy igen nagy mérési adathalmaz megfelelő megfontolások szerinti feldolgozása szükséges. A feladat nehézségét mutatja, hogy a 3 elrendezés összesen 45 jelpárjából paraméterhármasonként adódik egy-egy TDOA érték. A paramétertér dimenzióit figyelembe véve ez  $45 \times 22 \times 7 \times 7$ , azaz 48510 TDOA érték. Ezekből adódik paraméterhármasonként egy átlagos abszolút hiba egy átlagos szórás érték, ami tehát összesen  $2 \times 22 \times 7 \times 7$ , azaz 2156 kiértékelendő adat, melyhez hozzáadódik a szüretlen jelhez tartozó 7-7 átlagos abszolút hiba és átlagos szórás, melyet a 7 TDOA meghatározó módszer szolgáltat. Az alábbi ábrák ezt az adathalmazt mutatják be, majd szemléltetik a végső paraméterhármas meghatározásához vezető megfontolásokat és transzformációkat.

A 7. ábra – 13. ábra intervallumban bemutatom a Level 1-7 dekompozíciós szintekhez tartozó kétdimenziós paraméterhalmazok átlagos abszolút TDOA hibáit és átlagos szórásait. Az ábrák táblázatainak cellái az átláthatóság érdekében a számszerű időértékek függvényében lettek kiszínezve. A megfelelően kis értékek cellái sötétzöld színnel, a közepes értékek cellái narancssárgával, a rossz értékek cellái pirossal, míg az elfogadhatatlanul hibás értékek cellái feketével lettek kiszínezve. Az ábrák táblázatainak oszlopai a vizsgált 7 TDOA módszerhez, sorai pedig a 22 wavelethez tartoznak.

Módszer Wavelet	TDOA értékek átlagos abszolút hibája [ns]							TDOA értékek átlagos szórása [ns]						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
db1	2.96	14.59	14.20	5.76	10.64	5.18	112	6.62	8.15	2.11	7.29	18.48	8.35	275
db2	2.75	36.93	14.23	5.52	10.63	4.09	2.01	6.93	89.03	2.09	7.51	18.47	684	8.12
db3	2.67	13.99	14.24	5.48	10.65	386	1.81	6.91	7.23	2.10	7.50	18.47	2850	8.16
db4	2.83	37.19	14.25	5.51	10.66	643	1.86	6.95	87.88	2.09	7.56	18.48	3087	8.15
db5	1.17	37.51	14.25	5.52	10.65	771	1.39	1.60	88.75	2.09	7.53	18.49	3155	3.41
db6	2.79	37.34	14.25	5.53	7.93	771	2.19	6.93	88.92	2.09	7.53	18.50	3311	8.15
db7	2.96	37.04	14.24	5.54	7.93	896	2.03	6.68	88.22	2.09	7.56	18.50	3820	8.34
db8	2.96	36.25	14.24	5.52	7.93	385	2.07	6.69	86.75	2.09	7.55	18.50	3923	8.14
db9	2.79	36.24	14.25	5.50	7.93	257	1.87	6.87	86.72	2.09	7.50	18.50	3665	8.25
db10	2.73	36.95	14.25	5.49	7.93	385	1.93	6.90	89.30	2.09	7.49	18.50	3119	8.09
sym2	2.75	36.93	14.23	5.52	10.63	4.09	2.01	6.93	89.03	2.09	7.51	18.47	684	8.12
sym3	2.67	13.99	14.24	5.48	10.65	386	1.81	6.91	7.23	2.10	7.50	18.47	2850	8.16
sym4	2.79	37.39	14.24	5.52	10.65	643	1.93	6.96	89.76	2.08	7.54	18.49	3679	8.52
sym5	2.99	36.66	14.24	5.54	7.93	771	2.07	6.68	86.72	2.09	7.56	18.51	3735	8.18
sym6	2.81	37.72	14.26	5.53	7.93	512	2.02	6.94	88.93	2.08	7.53	18.50	3805	8.30
sym7	2.76	36.94	14.24	5.50	7.93	1283	1.84	6.88	89.29	2.10	7.52	18.50	2739	8.11
sym8	2.85	37.75	14.25	5.54	7.93	768	1.78	6.93	88.92	2.08	7.55	18.50	3570	8.37
coif1	2.77	36.99	14.23	5.54	10.62	515	1.97	6.97	89.80	2.10	7.54	18.47	1196	8.40
coif2	2.75	36.99	14.25	5.51	10.65	1028	2.16	6.97	89.78	2.08	7.53	18.49	3100	8.24
coif3	2.80	37.36	14.26	5.54	7.93	257	2.19	6.94	88.91	2.08	7.53	18.50	3467	8.15
coif4	2.81	37.36	14.25	5.52	7.93	513	1.78	6.94	88.81	2.08	7.51	18.50	3258	8.37
coif5	2.83	37.49	14.25	5.52	7.93	515	1.78	6.92	88.63	2.08	7.51	18.50	3258	8.37

7. ábra: Level 1 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei

		TDOA értékek átlagos abszolút hibája [ns]							TDOA értékek átlagos szórása [ns]						
Módszer	Wavelet	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
db1		1.50	14.40	14.11	5.69	8.85	6.40	0.93	1.09	5.62	2.15	7.24	21.80	7.15	3.45
db2		1.52	14.91	14.10	5.73	9.83	893	0.91	1.22	6.83	2.13	7.34	23.00	2251	3.48
db3		1.51	14.79	14.12	6.78	9.83	1026	0.78	1.21	6.15	2.11	7.87	23.00	3326	3.40
db4		1.42	14.53	14.11	5.76	9.84	898	0.98	1.12	5.75	2.11	7.25	22.99	3539	3.53
db5		3.43	14.27	14.10	5.71	9.84	1665	2.43	7.75	5.90	2.12	7.26	22.99	2977	8.90
db6		1.55	14.70	14.10	5.72	9.84	515	0.98	1.13	5.95	2.12	7.34	22.99	3445	3.45
db7		1.43	14.65	14.10	6.75	9.85	257	0.96	1.13	5.99	2.11	7.84	22.99	3683	3.62
db8		3.45	14.32	14.09	5.72	9.86	640	3.25	7.69	6.04	2.13	7.30	22.99	3713	10.88
db9		1.56	14.65	14.09	5.74	9.86	129	0.92	1.12	5.93	2.14	7.35	22.99	3589	3.49
db10		1.46	14.66	14.10	5.72	9.86	768	0.96	1.14	5.95	2.11	7.31	22.99	3758	3.48
sym2		1.52	14.91	14.10	5.73	9.83	893	0.91	1.22	6.83	2.13	7.34	23.00	2251	3.48
sym3		1.51	14.79	14.12	6.78	9.83	1026	0.78	1.21	6.15	2.11	7.87	23.00	3326	3.40
sym4		1.41	14.51	14.11	6.73	9.84	770	0.93	1.11	5.71	2.12	7.86	22.99	3577	3.62
sym5		1.45	14.54	14.10	5.74	9.84	1153	0.98	1.12	5.77	2.13	7.27	22.99	3335	3.47
sym6		1.56	14.98	14.11	5.72	9.85	1153	0.73	1.16	5.86	2.13	7.34	22.99	3267	3.49
sym7		1.56	14.69	14.10	5.72	9.85	1025	0.93	1.12	5.96	2.12	7.33	22.99	3318	3.49
sym8		1.47	14.30	14.10	5.74	9.86	385	1.00	1.15	5.99	2.11	7.28	22.99	3551	3.51
coif1		1.41	14.48	14.11	5.78	9.83	637	1.03	1.18	5.85	2.13	7.28	23.00	2423	3.70
coif2		1.45	14.53	14.11	5.77	9.84	384	0.99	1.11	5.76	2.11	7.27	22.99	3770	3.50
coif3		1.49	14.49	14.10	5.73	9.84	385	0.96	1.12	5.73	2.12	7.26	22.99	3763	3.51
coif4		1.49	14.31	14.10	5.72	9.86	513	0.99	1.14	5.98	2.11	7.28	22.99	3625	3.53
coif5		1.49	14.03	14.10	5.70	9.86	770	1.01	1.14	6.38	2.11	7.30	22.99	3568	3.53

8. ábra: Level 2 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei

		TDOA értékek átlagos abszolút hibája [ns]							TDOA értékek átlagos szórása [ns]						
Módszer	Wavelet	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
db1		1.46	14.94	14.14	5.80	5.20	5.88	1.14	1.17	4.52	2.07	7.45	18.06	9.12	3.66
db2		1.60	14.51	14.08	5.78	8.90	894	0.81	1.22	5.67	2.12	7.32	21.77	2581	3.65
db3		1.60	15.35	14.09	5.77	9.86	1410	0.94	1.10	4.68	2.14	7.36	22.99	3123	3.37
db4		3.45	14.68	14.09	5.75	9.86	1152	2.51	7.73	5.96	2.15	7.33	22.99	3346	8.81
db5		1.55	14.61	14.09	5.75	9.86	1025	1.15	1.10	5.91	2.13	7.37	22.99	3495	3.41
db6		3.41	15.02	14.09	5.73	9.87	513	2.59	7.71	5.88	2.13	7.32	22.99	3797	8.84
db7		1.57	14.64	14.09	5.75	9.87	1025	1.16	1.12	5.96	2.14	7.38	22.99	3241	3.39
db8		3.43	14.66	14.08	5.73	9.87	1153	2.41	7.69	5.94	2.15	7.33	22.99	3497	8.74
db9		1.55	14.66	14.10	5.75	9.87	1923	1.14	1.12	5.96	2.12	7.38	22.99	3093	3.40
db10		3.44	14.61	14.08	5.75	9.87	769	2.61	7.70	5.97	2.15	7.33	22.99	3504	8.80
sym2		1.60	14.51	14.08	5.78	8.90	894	0.81	1.22	5.67	2.12	7.32	21.77	2581	3.65
sym3		1.60	15.35	14.09	5.77	9.86	1410	0.94	1.10	4.68	2.14	7.36	22.99	3123	3.37
sym4		1.53	14.99	14.09	5.74	9.86	768	0.95	1.10	5.86	2.14	7.35	22.99	3564	3.51
sym5		3.41	15.02	14.08	5.76	9.87	1024	2.82	7.69	5.91	2.15	7.39	22.99	3495	8.84
sym6		1.55	14.59	14.08	5.76	9.87	641	0.94	1.10	5.96	2.16	7.34	22.99	2991	3.41
sym7		3.46	14.99	14.09	5.74	9.87	1024	2.83	7.67	5.87	2.13	7.38	22.99	3694	8.85
sym8		3.43	14.36	14.08	5.75	9.87	515	2.55	7.72	5.99	2.15	7.31	22.99	3615	8.82
coif1		1.55	14.53	14.08	5.75	8.90	383	1.26	1.23	5.79	2.13	7.38	21.77	2628	3.67
coif2		3.48	14.33	14.10	5.75	9.86	640	2.38	7.72	5.94	2.15	7.33	22.99	3522	8.75
coif3		1.57	14.99	14.09	5.77	9.87	1153	1.16	1.12	5.89	2.14	7.38	22.99	2987	3.40
coif4		3.45	14.34	14.08	5.75	9.87	768	2.41	7.72	5.99	2.15	7.33	22.99	3789	8.78
coif5		1.55	14.64	14.09	5.75	9.87	1025	1.14	1.12	5.95	2.14	7.38	22.99	3265	3.42

9. ábra: Level 3 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei

		TDOA értékek átlagos abszolút hibája [ns]							TDOA értékek átlagos szórása [ns]						
Wavelet	Módszer	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
db1		1.52	15.72	14.09	5.96	12.72	3.51	0.28	1.77	3.84	2.03	7.90	0.00	11.91	3.55
db2		1.97	77.68	14.10	6.51	7.39	771	1.13	1.69	235	2.09	8.18	13.36	2446	3.34
db3		1.86	18.43	14.03	5.71	5.38	256	1.13	1.73	20.67	2.12	7.46	18.00	3438	3.74
db4		3.02	15.21	14.10	5.92	5.33	769	7.30	21.20	6.40	2.09	7.86	17.95	3312	34.24
db5		1.68	14.74	14.08	6.50	8.02	1152	1.05	1.16	6.07	2.20	8.04	18.39	3568	3.35
db6		3.48	15.19	14.11	5.77	7.99	640	2.85	7.72	4.74	2.10	7.35	18.39	3503	9.87
db7		1.60	15.22	14.10	5.70	8.94	1410	1.04	1.25	4.39	2.11	7.57	21.77	3412	3.66
db8		1.63	14.85	14.08	6.82	8.92	897	1.05	1.09	5.98	2.15	7.82	21.77	3429	3.41
db9		1.58	15.19	14.09	5.78	8.92	513	0.73	1.17	4.76	2.11	7.41	21.77	3791	3.45
db10		1.65	15.56	14.09	5.74	8.92	1538	0.92	1.18	3.66	2.11	7.53	21.77	3492	3.49
sym2		1.97	77.68	14.10	6.51	7.39	771	1.13	1.69	235	2.09	8.18	13.36	2446	3.34
sym3		1.86	18.43	14.03	5.71	5.38	256	1.13	1.73	20.67	2.12	7.46	18.00	3438	3.74
sym4		1.78	15.19	14.05	5.82	5.33	1411	1.11	1.70	6.70	2.12	7.31	17.95	3383	3.62
sym5		1.78	14.55	14.08	6.49	8.02	897	1.12	1.22	6.03	2.16	8.10	18.39	3188	3.44
sym6		1.75	15.21	14.11	5.79	7.99	898	0.91	1.67	4.72	2.10	7.34	18.39	3258	3.59
sym7		1.65	15.21	14.11	5.75	8.94	1153	1.14	1.23	4.37	2.12	7.58	21.77	3346	3.59
sym8		3.50	15.38	14.10	5.77	8.92	513	2.87	7.73	4.60	2.10	7.35	21.77	3657	9.97
coif1		2.12	35.87	14.06	5.27	7.39	769	1.34	1.75	88.32	2.15	6.56	13.36	2558	3.86
coif2		3.83	14.76	14.09	5.76	5.32	641	2.88	7.91	4.63	2.06	7.34	17.96	3550	10.06
coif3		3.32	15.17	14.11	5.89	7.98	1410	9.09	17.75	4.27	2.10	7.85	18.41	3412	31.44
coif4		1.68	14.85	14.08	6.29	8.92	1025	1.02	1.21	5.59	2.13	8.20	21.77	3272	3.48
coif5		1.55	14.86	14.08	5.79	8.92	1026	0.77	1.06	5.94	2.16	7.36	21.77	3212	3.43

10. ábra: Level 4 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei

		TDOA értékek átlagos abszolút hibája [ns]							TDOA értékek átlagos szórása [ns]						
Wavelet	Módszer	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
db1		0.49	15.72	14.45	6.95	9.19	6.86	1.46	2.93	6.72	3.86	10.49	4.68	6.37	2.75
db2		4.36	14.48	14.17	4.59	2.93	573	5.07	16.57	7.32	3.63	8.75	4.39	2422	16.19
db3		1.05	15.21	14.28	7.27	3.07	1153	0.73	0.51	2.61	2.87	8.22	4.51	3594	3.22
db4		1.27	15.11	14.33	5.86	3.11	769	1.22	2.67	3.38	3.75	8.33	4.51	2959	3.03
db5		0.86	15.61	14.39	3.75	3.99	1281	1.10	0.47	2.00	3.25	6.20	5.22	3376	1.43
db6		0.58	15.36	14.23	5.92	3.09	642	0.29	2.45	2.04	2.70	7.73	4.51	3562	3.32
db7		2.77	15.49	14.32	6.45	3.09	1025	2.69	7.82	1.92	3.55	8.75	4.51	3258	8.14
db8		9.23	15.94	14.37	4.79	3.08	1538	9.65	32.49	1.57	3.15	6.27	4.52	3723	31.05
db9		0.92	15.70	14.28	5.82	3.08	898	0.79	0.46	1.50	2.62	8.39	4.52	3188	1.35
db10		0.80	15.15	14.26	6.40	3.08	386	1.59	0.55	2.17	2.66	8.28	4.52	3737	1.22
sym2		4.36	14.48	14.17	4.59	2.93	573	5.07	16.57	7.32	3.63	8.75	4.39	2422	16.19
sym3		1.05	15.21	14.28	7.27	3.07	1153	0.73	0.51	2.61	2.87	8.22	4.51	3594	3.22
sym4		0.98	15.72	14.17	6.81	3.10	769	1.56	0.47	1.84	1.86	8.93	4.53	3758	2.22
sym5		0.92	15.75	14.29	4.74	3.10	642	0.99	0.61	1.62	3.05	7.07	4.51	3562	1.36
sym6		2.95	15.71	14.17	6.77	3.10	1154	2.82	7.73	1.66	1.85	8.27	4.51	3608	8.43
sym7		0.67	15.73	14.34	6.02	3.09	1025	1.12	0.48	2.00	3.10	6.91	4.51	3533	1.20
sym8		7.99	15.69	14.28	6.38	3.08	1539	9.79	29.74	1.58	2.64	8.29	4.52	3221	28.92
coif1		1.33	13.67	14.38	6.98	2.94	257	1.95	0.62	5.31	2.90	7.98	4.39	1891	3.26
coif2		0.97	15.49	14.18	6.84	3.10	770	1.59	0.51	2.04	1.87	8.94	4.53	3622	2.06
coif3		2.80	15.55	14.41	6.51	3.09	643	2.69	7.79	1.97	3.43	8.77	4.51	3507	8.23
coif4		1.23	15.68	14.34	5.64	3.08	513	1.21	2.51	1.94	3.03	6.22	4.52	3238	2.78
coif5		0.73	15.41	14.34	5.93	3.08	387	1.15	0.36	2.15	3.08	6.90	4.52	3576	1.06

11. ábra: Level 5 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei

		TDOA értékek átlagos abszolút hibája [ns]							TDOA értékek átlagos szórása [ns]						
Módszer	Wavelet	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
db1		1.93	13.42	15.03	6.20	5.85	3.32	1.29	4.95	15.27	13.07	7.62	6.15	11.00	3.23
db2		3.44	15.49	15.34	7.37	6.05	386	5.54	6.43	11.91	11.31	12.87	6.10	2713	19.07
db3		5.37	17.90	18.28	4.13	2.45	768	11.09	12.38	16.96	16.33	9.22	0.10	3424	28.35
db4		3.93	13.74	14.35	5.82	2.68	640	5.64	16.00	14.28	14.26	8.53	0.15	3498	26.95
db5		9.14	17.52	14.54	6.60	2.81	1153	14.58	28.39	10.79	11.21	7.90	0.19	3558	40.39
db6		4.94	17.81	17.07	4.82	2.89	1281	6.52	19.46	12.23	12.14	10.80	0.18	3339	36.64
db7		6.21	15.74	17.45	3.70	3.00	1281	8.02	19.29	13.26	13.71	7.18	0.15	3387	23.11
db8		5.06	14.98	14.11	4.74	3.04	1538	4.51	18.19	9.60	12.04	8.33	0.18	3343	18.67
db9		7.06	17.61	15.89	5.25	3.12	1794	6.38	21.94	11.26	8.87	8.46	0.19	3393	23.57
db10		7.23	16.92	16.46	5.43	3.15	1538	5.84	21.97	9.95	8.70	8.79	0.17	3282	26.12
sym2		3.44	15.49	15.34	7.37	6.05	386	5.54	6.43	11.91	11.31	12.87	6.10	2713	19.07
sym3		5.37	17.90	18.28	4.13	2.45	768	11.09	12.38	16.96	16.33	9.22	0.10	3424	28.35
sym4		5.56	16.19	16.94	2.97	2.66	640	11.47	15.63	13.73	16.98	5.74	0.15	3490	38.03
sym5		11.04	15.32	15.55	4.90	2.82	385	16.33	25.39	10.83	10.76	12.60	0.18	3394	32.86
sym6		7.64	15.94	17.52	2.80	2.89	640	7.49	18.50	14.08	15.85	7.03	0.16	3326	18.93
sym7		7.15	14.44	14.42	6.21	3.00	640	5.62	20.42	9.28	14.04	7.26	0.17	3550	22.50
sym8		6.65	15.99	17.54	3.49	3.05	512	7.31	16.47	13.71	14.96	7.68	0.18	3653	22.15
coif1		7.20	16.27	18.52	5.06	6.05	257	20.70	12.54	16.52	17.33	9.06	6.09	2328	33.53
coif2		7.57	16.97	18.83	3.42	2.70	1794	8.77	15.91	17.08	16.60	7.74	0.12	3393	32.75
coif3		8.85	15.16	16.80	3.00	2.97	1027	8.66	18.32	12.13	15.52	5.76	0.18	3516	18.20
coif4		7.55	14.83	14.88	2.57	3.10	1153	7.38	16.54	11.32	11.94	5.44	0.18	3384	16.23
coif5		7.05	14.33	14.44	2.33	3.16	385	7.43	14.27	12.10	10.99	7.01	0.20	3266	14.78

12. ábra: Level 6 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei

		TDOA értékek átlagos abszolút hibája [ns]							TDOA értékek átlagos szórása [ns]						
Módszer	Wavelet	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
db1		7.84	17.03	19.21	10.45	11.12	1.98	9.15	21.45	41.75	40.87	21.95	16.40	0.09	35.00
db2		13.05	36.53	39.39	12.90	3.62	636	9.15	18.20	42.09	35.55	13.64	9.35	2553	17.64
db3		14.88	7.53	3.91	3.89	20.16	512	25.55	38.79	20.82	20.63	6.61	24.49	3454	44.50
db4		16.41	32.64	28.74	10.89	30.67	896	13.89	30.49	44.73	39.63	27.34	43.66	3266	27.36
db5		21.89	101	37.82	21.23	22.21	1025	19.68	39.59	273	38.26	20.12	36.03	3000	44.63
db6		13.82	219	12.87	12.75	11.56	1538	11.23	47.03	930	37.70	11.30	13.22	3299	34.70
db7		22.52	8.05	7.73	11.94	35.94	1281	19.85	48.07	16.99	16.23	32.97	24.74	3440	46.02
db8		27.32	16.14	12.21	6.30	30.61	1281	25.51	90.35	46.00	48.64	23.31	33.12	3163	81.80
db9		19.15	77.22	28.74	12.37	16.18	1410	16.97	49.11	286	55.75	19.87	17.98	3221	41.27
db10		22.09	214	9.56	15.53	10.88	1282	18.66	54.10	417	24.75	12.67	10.30	3417	44.15
sym2		13.05	36.53	39.39	12.90	3.62	636	9.15	18.20	42.09	35.55	13.64	9.35	2553	17.64
sym3		14.88	7.53	3.91	3.89	20.16	512	25.55	38.79	20.82	20.63	6.61	24.49	3454	44.50
sym4		10.78	22.16	33.27	8.78	33.89	895	4.95	33.66	42.39	42.51	13.80	41.73	3651	32.94
sym5		22.82	333	63.52	4.61	13.17	640	21.02	56.81	1273	58.77	7.27	15.08	3363	37.54
sym6		11.15	19.77	19.72	14.54	46.68	514	10.42	36.03	47.99	46.36	22.76	43.05	3238	31.93
sym7		17.98	44.13	50.09	27.23	41.53	897	19.97	57.38	39.87	39.57	30.49	50.81	3504	40.83
sym8		23.02	200	15.76	25.14	44.10	897	12.61	97.72	760	53.35	35.54	21.30	3654	93.63
coif1		15.50	14.91	14.47	1.44	16.49	652	26.53	34.05	39.20	31.82	3.39	17.15	2582	52.89
coif2		7.10	6.59	13.98	8.98	33.10	1666	8.65	37.40	26.09	41.82	21.44	29.70	3332	32.09
coif3		13.56	16.31	17.03	18.02	49.35	1155	13.49	44.55	44.92	45.23	23.44	39.40	3042	40.48
coif4		13.32	20.04	23.21	34.04	48.77	1153	19.82	55.14	64.62	62.96	43.40	34.01	3539	44.84
coif5		66.12	31.68	33.34	39.72	39.87	898	34.51	123	68.57	62.30	55.50	26.99	3187	79.02

13. ábra: Level 7 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei

A fenti 7 ábra táblázatait átfutva első ránézésre is megállapítható, hogy a Level 1-5 dekompozíciós szintek esetén az #1 és a #7 módszerek wavelet típustól nagyjából függetlenül pontos eredményt szolgáltatnak, a többi módszerhez képest



alacsony szórásokkal, a Level 5 fölötti kísérletek pedig általános jelleggel egyaránt növelték a hibát és a szórást. Ezeket a megállapításokat számszerűsíti a 14. ábra táblázata, melyben az előző 7 táblázat lett oly módon összefoglalva, hogy dekompozíciós szintenként az oszlopok értékei, tehát az egyes wavelet típusok eredményei lettek átlagolva minden TDOA módszerhez. Ezt a fajta egyszerűsítést azért tehetjük meg, mert ahogy a fenti 7 táblázatból láthattuk, az oszlopon belüli eredmények csupán kis mértékben különböznek, így ezek átlagolása megfelelő pontossággal képviseli az egyes elemek értékeit.

A 14. ábra táblázatában az összehasonlíthatóság érdekében feltüntettem a szűretlen jelek TDOA számításainak eredményeit is, melyből látható, hogy a saját fejlesztésű #7 módszer valóban csak szűréssel együtt alkalmazható megfelelően, valamint megállapíthatjuk, hogy a szűrés alkalmazása leginkább a legpontosabb módszerekre (#1, #7) gyakorolt jelentősebb pozitív hatást, a többit csak kis mértékben változtatta.

		TDOA értékek átlagos abszolút hibája [ns]							TDOA értékek átlagos szórása [ns]						
Szint	Módszer	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
	Szűrő nélkül	2.83	48.53	14.25	5.52	7.93	8.23	331	6.97	128	2.09	7.56	18.50	19.89	1003
	Level 1	2.74	33.98	14.24	5.53	9.16	532	6.91	6.64	77.58	2.09	7.52	18.49	2862	20.12
	Level 2	1.67	14.57	14.10	5.92	9.80	722	1.11	1.74	6.00	2.12	7.40	22.94	3185	4.09
	Level 3	2.33	14.74	14.09	5.75	9.52	914	1.67	3.82	5.72	2.13	7.36	22.60	3134	5.66
	Level 4	2.13	22.04	14.08	5.97	7.86	851	1.91	3.94	31.16	2.12	7.62	18.00	3142	7.07
	Level 5	2.20	15.36	14.29	6.01	3.38	804	2.51	6.13	2.88	2.97	8.03	4.54	3153	6.85
	Level 6	6.34	15.91	16.25	4.65	3.45	862	8.51	16.45	12.96	13.37	8.51	1.24	3154	24.70
	Level 7	18.56	67.36	23.99	14.43	26.53	926	17.11	48.62	209	40.86	21.23	26.47	3087	43.88

14. ábra: Vizsgálati eredmények összefoglalása wavelet típusok mentén történő átlagolással

A 14. ábra eredményeiből látható, hogy a #2, #3 és #6 módszerek minden esetben elfogadhatatlan mértékű hibát adtak, így a továbbiakban csak az #1, #4, #5 és #7 módszereket fogom figyelembe venni az adatok értékelése során. A következő vizsgálati lépés célja megtalálni azokat a wavelet függvényeket, melyek a fenti 4 TDOA módszertől függetlenül pontosabb eredményt adnak a többinél. Ehhez a vizsgálathoz a 4 megmaradt módszer értékeit kell oly módon átlagolni, hogy az egyes waveletek közötti eltéréseket lehessen vizsgálni, ehhez pedig azt kell megfigyelni, hogy az eredeti 7 táblázat oszlopai mentén hogyan változnak a vizsgálati eredmények. Ez az oszlopmenti változás akkor átlagolható reprezentatívan az egyes módszerek mentén, ha előtte minden oszlopot megfelelő megfontolások mellett normalunk.

A most következő vizsgálati lépés során azt is látni szeretnénk, hogy az egyes szintek eredményei hogyan viszonyulnak egymáshoz, így TDOA módszerenként az adott

dekompozíciós szinttől függetlenül rögzített értékre kell normálni az eredményeket. A 15. ábra eredményei ezen megfontolások mentén úgy adódtak, hogy a 4 kiválasztott TDOA módszer (#1, #4, #5 és #7) oszlopainak értékeit minden dekompozíciós szint táblázata esetén az adott módszer Level 1 esetén mutatott maximumával osztva normáltam. Mivel az eredeti 7 táblázat egyes oszlopain belül többnyire hasonló értékek szerepeltek, így a Level 1-es maximumokkal normált értékek minden oszlop esetén azonos nagyságrendbe kerültek, ami lehetővé tette a 4 meghagyott módszer normált értékeinek átlagolását az egyes wavelet típusok esetén. A 15. ábra így adódó táblázata megmutatja, hogy az egyes dekompozíciós szintek, illetve wavelet típusok esetén milyen arányban változnak egymáshoz képest a vizsgálati értékek. Fontos tehát kiemelni, hogy ez a táblázat a vizsgált értékek relatív változásait szemlélteti hitelesen.

Wavelet	Szint	TDOA értékek átlagos normált abszolút hibája [-]							TDOA értékek átlagos normált szórása [-]						
		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6	Level 7	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6	Level 7
db1		1.00	0.58	0.50	0.69	0.56	0.57	1.39	0.98	0.58	0.54	0.33	0.52	0.52	1.75
db2		0.72	0.61	0.59	0.62	0.64	0.76	1.76	0.75	0.60	0.58	0.51	0.96	0.76	1.25
db3		0.72	0.65	0.62	0.53	0.48	0.71	1.94	0.75	0.62	0.60	0.56	0.35	0.78	1.98
db4		0.73	0.60	0.77	0.65	0.44	0.66	2.60	0.76	0.59	0.84	1.29	0.43	0.88	2.61
db5		0.59	0.77	0.61	0.61	0.33	1.15	3.32	0.56	0.84	0.60	0.56	0.29	1.32	2.61
db6		0.66	0.61	0.77	0.74	0.38	0.71	2.01	0.75	0.60	0.84	0.78	0.41	1.09	2.27
db7		0.68	0.65	0.62	0.59	0.59	0.77	3.29	0.75	0.61	0.60	0.59	0.64	0.95	3.19
db8		0.68	0.78	0.77	0.64	1.07	0.71	3.33	0.75	0.84	0.84	0.59	1.46	0.95	4.53
db9		0.66	0.61	0.61	0.59	0.40	0.91	2.56	0.75	0.60	0.60	0.58	0.36	1.09	2.70
db10		0.66	0.60	0.77	0.60	0.42	0.93	2.82	0.75	0.60	0.84	0.59	0.36	1.10	2.54
sym2		0.72	0.61	0.59	0.62	0.64	0.76	1.76	0.75	0.60	0.58	0.51	0.96	0.76	1.25
sym3		0.72	0.65	0.62	0.53	0.48	0.71	1.94	0.75	0.62	0.60	0.56	0.35	0.78	1.98
sym4		0.73	0.64	0.61	0.53	0.45	0.68	2.09	0.76	0.61	0.60	0.55	0.38	0.79	2.26
sym5		0.68	0.60	0.77	0.62	0.36	1.24	2.47	0.75	0.59	0.84	0.56	0.32	1.36	2.52
sym6		0.67	0.61	0.61	0.59	0.62	0.85	2.68	0.76	0.60	0.60	0.55	0.62	0.92	2.66
sym7		0.66	0.61	0.78	0.60	0.39	0.95	3.71	0.75	0.60	0.84	0.59	0.31	1.00	3.79
sym8		0.67	0.61	0.77	0.76	1.04	0.80	4.08	0.76	0.60	0.84	0.82	1.43	0.87	5.05
coif1		0.73	0.60	0.59	0.58	0.49	1.01	1.81	0.76	0.60	0.59	0.46	0.35	0.86	1.61
coif2		0.72	0.61	0.78	0.70	0.45	0.86	1.78	0.76	0.59	0.84	0.78	0.38	0.86	2.48
coif3		0.67	0.61	0.62	0.74	0.60	0.96	3.10	0.76	0.59	0.60	1.17	0.64	0.87	2.94
coif4		0.66	0.61	0.77	0.62	0.42	0.83	3.78	0.75	0.60	0.84	0.61	0.36	0.79	3.91
coif5		0.67	0.61	0.61	0.59	0.39	0.78	8.27	0.75	0.60	0.60	0.58	0.30	0.76	6.67

15. ábra: Vizsgálati eredmények relatív változásainak szemléltetése a Level 1-es maximumokra normált értékek #1, #4, #5, #7 módszerek mentén történő átlagolásával

A 15. ábra táblázatából mind pontosság, mind szórás tekintetében kiemelkednek a Level 5-ös vizsgálatok eredményei, így ezen a ponton kijelenthető, hogy valószínűleg az 5-ös dekompozíciós szint lesz az egyik kiválasztott paraméter. A táblázat az eddigi eredményekhez hasonlóan jól mutatja, hogy a 6-os és 7-es dekompozíciós szintek eredményei minden szempontból rosszabbak a többinél, így a következő vizsgálati lépéshez már csak a Level 1-5 szintek eredményeit veszem figyelembe.

A fenti táblázatból továbbra sem egyértelmű, hogy mely wavelet típusok adnak jobb eredményt a többinél, így a következő vizsgálati lépéshez az előzőhöz hasonló adatösszevonásra van szükség. A 16. ábra összevont adatainak eléréséhez első lépésként a fenti táblázat normált értékeit oszloponként (dekompozíciós szintenként) normáltam az adott oszlophoz tartozó maximális értékre. Ez ismét logikailag helyes lépés volt, hiszen a 15. ábra oszlopain belül hasonló értékű adatok szerepelnek, így ezek oszloponkénti normálása minden oszlopban hasonló eredményeket eredményez, kiemelve a soronkénti (wavelet típusonkénti) eltéréseket. Ez lehetővé teszi a 16. ábra értékeihez szükséges következő lépést, ami a kiválasztott Level 1-5 oszlopok kétszeresen normált adatainak átlagát mutatja minden vizsgált wavelet típus esetén.

Wavelet	Szint	TDOA értékek átlagos <u>normált</u> abszolút hibája [-]	TDOA értékek átlagos <u>normált</u> szórása [-]
		Level 1-5 <u>normált</u> átlaga	Level 1-5 <u>normált</u> átlaga
db1		0.763	0.587
db2		0.740	0.647
db3		0.700	0.578
db4		0.754	0.756
db5		0.699	0.583
db6		0.754	0.672
db7		0.727	0.621
db8		0.904	0.844
db9		0.681	0.578
db10		0.723	0.635
sym2		0.740	0.647
sym3		0.700	0.578
sym4		0.693	0.580
sym5		0.721	0.625
sym6		0.719	0.610
sym7		0.721	0.630
sym8		0.883	0.819
coif1		0.697	0.556
coif2		0.771	0.668
coif3		0.755	0.708
coif4		0.733	0.640
coif5		0.677	0.570

16. ábra: Vizsgálati eredmények wavelet típusától való függése a dekompozíciós szintek maximumaira normált átlagos normált értékek Level 1-5 szintek mentén történő átlagolásával

A 16. ábra többszörösen transzformált eredő adatai az eddig a pontig vezető gondolatmenet alapján megfelelően képviselik az adott wavelet típus hibáinak és szórásainak összesített jóságát. A következő vizsgálati lépéshez azokat a waveleteket választottam ki, melyek mind a becslési hiba, mind a szórás szempontjából megfelelően pontosnak bizonyultak. A táblázat azon adatai tekinthetők megfelelően pontosnak, melyek cellái értékük alapján a zöld valamely árnyalatával lettek kiszínezve. Ennek

tudatában a végső vizsgálati lépéshez a db3, db5, db9, sym3, sym4, coif1 és coif5 waveletek lettek kiválasztva, ugyanis ennél a 7 típusnál adódott mind a szórás, mind a hiba zöld értékűnek. A 17. ábra a 14. ábra táblázatának oly módon javított változata, hogy az eredeti 7 táblázat oszlopainak elemeit kizárólag az imént kiválasztott 7 wavelet típus mentén átlagoltam, ezzel kizárva azokat a típusokat, melyek nem szolgáltattak megfelelő megbízhatóságú és pontosságú eredményeket.

Módszer	TDOA értékek javított átlagos abszolút hibája [ns]							TDOA értékek javított átlagos szórása [ns]						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Szűrő nélkül	2.83	48.53	14.25	5.52	7.93	8.23	331	6.97	128	2.09	7.56	18.50	19.89	1003
Level 1	2.53	30.52	14.24	5.51	9.87	496	1.79	6.16	65.45	2.09	7.52	18.49	2951	7.61
Level 2	1.76	14.50	14.11	6.18	9.84	860	1.13	2.10	6.01	2.12	7.54	22.99	3255	4.29
Level 3	1.56	14.88	14.09	5.75	9.73	1135	1.07	1.12	5.55	2.13	7.37	22.81	3184	3.45
Level 4	1.78	18.96	14.06	5.80	7.05	769	1.04	1.47	21.88	2.14	7.37	18.47	3341	3.60
Level 5	0.99	15.22	14.31	6.26	3.19	843	1.14	0.49	2.58	2.78	7.83	4.60	3282	2.25
Level 6	6.68	16.82	16.70	4.35	3.24	824	11.82	16.79	14.05	14.00	8.09	1.00	3269	29.57
Level 7	23.31	37.39	22.21	13.05	24.14	844	21.96	50.96	107	38.84	17.99	26.98	3221	48.54

17. ábra: Vizsgálati eredmények javított összefoglalása a db3, db5, db9, sym3, sym4, coif1, coif5 wavelet típusok mentén történő átlagolással

A 17. ábra értékeiből egyértelműen megállapítható, hogy mind pontosság, mind szórás tekintetében az 5-ös dekompozíciós szint és az #1 módszer párosítása bizonyult a legpontosabbnak a fenti 7 wavelet eredményeinek összevonásával. Pontosság és szórás szempontjából második helyen áll a saját fejlesztésű #7 módszer, mely több esetben is pontosabbnak bizonyult az #1 módszernél, a szórásai viszont túl nagyok a megfelelő megbízhatóság eléréséhez, így a végső optimális wavelet szűrőhöz az #1 módszert választottam ki.

Bár a most vizsgált jelek esetében egyértelműen megállapítható, hogy a Level 5 dekompozíciós szint a legjobb választás, itt azonban figyelembe kell venni, hogy a dekompozíciós szint az alkalmazott aluláteresztő szűrő felső határfrekvenciáját határozza meg, ami jelen esetben  $F_s/2^{5+1}$ , ez pedig a jelenlegi 5 GSa/s mintavételi frekvenciával számolva nagyjából 80 MHz felső határfrekvenciát jelent. Ez azonos a kutatás előző fázisában ugyanehhez a forráshoz meghatározott, Fourier-transzformációra épülő aluláteresztő szűrő határfrekvenciájával. [2] A feldolgozott jelet ez a felső határfrekvencia jellemzi, ez viszont a mintavételi frekvencia függvényében eltérő dekompozíciós szinteket eredményezne, így az 5-ös szint nem általánosítható.

Valós kislési jelek esetén, nem tudva az elvi TDOA értékeket, nem tudjuk megvizsgálni, hogy az adott jel esetén mely dekompozíciós szint adja a legkisebb hibát,

így a megválaszolendő kérdés a következő: „Hogyan állapítható meg a vizsgált jelhez tartozó ideális dekompozíciós szint, kizárólag a mért jelek alapján?” A válasza a 17. ábra első oszlopának vizsgálata vezet rá bennünket, ahol az #1 módszer átlagos abszolút TDOA hibái és a hozzájuk tartozó átlagos szórások között arányosság fedezhető fel. Ennek ellenőrzésére az utolsó vizsgálati lépés során az eredeti 7 táblázat #1 módszerhez tartozó abszolút hiba és szórás értékeit vizsgáltam a dekompozíciós szint és a 7 kiválasztott wavelet típus esetén. Az eredeti 7 táblázat #1 módszerre vonatkozó ezen kivonatát tartalmazza a 18. ábra.

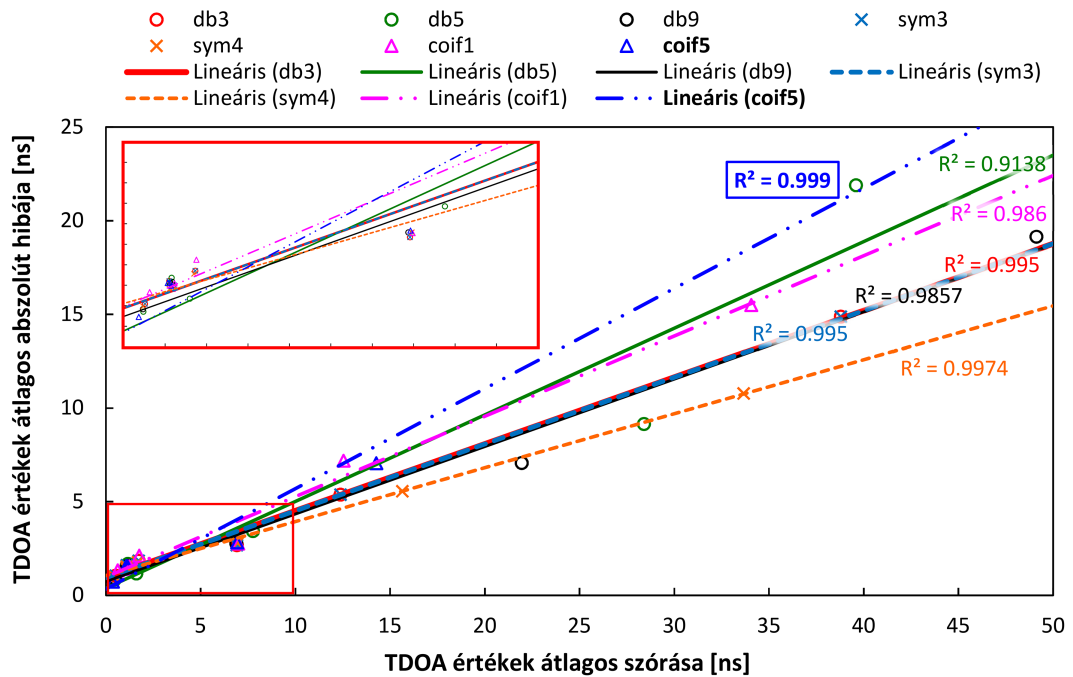
#1 módszer Wavelet	TDOA értékek átlagos abszolút hibája [ns]							TDOA értékek átlagos szórása [ns]						
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6	Level 7	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6	Level 7
db3	2.67	1.51	1.60	1.86	1.05	5.37	14.88	6.91	1.21	1.10	1.73	0.51	12.38	38.79
db5	1.17	3.43	1.55	1.68	0.86	9.14	21.89	1.60	7.75	1.10	1.16	0.47	28.39	39.59
db9	2.79	1.56	1.55	1.58	0.92	7.06	19.15	6.87	1.12	1.12	1.17	0.46	21.94	49.11
sym3	2.67	1.51	1.60	1.86	1.05	5.37	14.88	6.91	1.21	1.10	1.73	0.51	12.38	38.79
sym4	2.79	1.41	1.53	1.78	0.98	5.56	10.78	6.96	1.11	1.10	1.70	0.47	15.63	33.66
coif1	2.77	1.41	1.55	2.12	1.33	7.20	15.50	6.97	1.18	1.23	1.75	0.62	12.54	34.05
coif5	2.83	1.49	1.55	1.55	0.73	7.05	66.12	6.92	1.14	1.12	1.06	0.36	14.27	122.73

18. ábra: A kiválasztott #1 módszer eredeti eredményeinek összefoglalása a dekompozíciós szint és a kiválasztott 7 wavelet típus függvényében

A 18. ábra eredeti, manipulálatlan vizsgálati eredményei jól mutatják, hogy a vizsgált jel esetén egyértelműen az 5-ös dekompozíciós szint adja a legkisebb szórási értékeket, melyekkel párban állnak a legkisebb becslési hibák is. Az is látható, hogy a fenti eredmények alapján a legjobb pontossági és szórási értékeket a coif5 típusú wavelet szolgáltatja. A kialakítandó wavelet szűrő általános használhatóságához meg kell bizonyosodni arról, hogy a TDOA értékek szórását vizsgálva megbízhatóan következtethetünk-e a becslés hibájának nagyságára. Ezt akkor láthatjuk be, ha kimutatható valamilyen konzisztens arányosság az egyes dekompozíciós szintek szórásai és abszolút hibái között. Ennek ellenőrzésére a 19. ábra a fenti táblázat összetartozó szórás-hiba párjait ábrázoltam a szórás-hiba síkon, a 7 wavelet esetén egyenként, majd mindegyik adathalmazra egy egyenest illeszttem, az ábrán pedig jelöltem az illesztés pontosságát ( $R^2$ ) is.

A 19. ábra illesztett egyeneseinek pontosságából látható, hogy mind a 7 vizsgált wavelet esetén több, mint 90% feletti a lineáris közelítés pontossága, tehát helyes a feltételezés, miszerint a legkisebb szórású átlagos TDOA értéket eredményező dekompozíciós szint lesz az optimális választás. Megfigyelhető továbbá, hogy a 18. ábra adatai alapján legjobbnak választott coif5 típusú wavelet szórás-hiba párjaira illesztett

egyenes több, mint 99,9%-os pontossággal illeszkedik a mért adatokra, így a `coif5` és az #1 módszer kombinációja esetén közel teljes mértékben bizonyosak lehetünk afelől, hogy a legkisebb átlagos szórást eredményező dekompozíciós szint fogja szolgáltatni a legpontosabb TDOA értékeket.



19. ábra: A kiválasztott #1 módszer átlagos szórásai és abszolút hibái közötti kapcsolat, változó dekompozíciós szint esetén

## 4 Konklúzió

### 4.1 Eredmények értékelése

Az előző fejezet gondolatmenetét követve kapott *coif5* – Level 5 – #1 módszer paraméterhármas bizonyult a minden szempontból legjobb választásnak, továbbá azt is beláttuk, hogy általános felhasználás esetén a *coif5* – #1 módszer paraméterpár alkalmazásával elegendő a számított TDOA értékek átlagos szórását figyelni, és úgy megválasztani a dekompozíciós szintet, hogy a szórás minimális legyen. A meghatározott optimális wavelet szűrő jóságának végső vizsgálatára a 20. ábra összehasonlítja a kiválasztott paraméterhármas átlagos abszolút hibáját és átlagos szórását a kutatás előző fázisában ugyanehhez a forráshoz manuális úton meghatározott, Fourier-transzformáció alapú, 80 MHz határfrekvenciájú aluláteresztő szűrő (LPF) és az #1 módszer kombinációjának átlagos eredményeivel. [2]

Végső összehasonlítás		TDOA értékek átlagos abszolút hibája [ns]	TDOA értékek átlagos szórása [ns]
Szűrő	Módszer	#1 módszer: Zaj küszöbözés	#1 módszer: Zaj küszöbözés
Wavelet: <i>coif5</i> , Level 5		0.729	0.363
Fourier: LPF, 80 MHz		0.932	0.164

20. ábra: Az optimális Wavelet- és Fourier-transzformáció alapú szűrők összehasonlítása

A végső összehasonlításból látható, hogy pontosság szempontjából a wavelet szűrő bizonyult optimálisabb megoldásnak, míg a Fourier-transzformáció alapú szűrő kisebb szórással biztosított valamivel nagyobb hibát. Ha ehhez az eredményhez hozzávesszük azt a megállapítást is, miszerint a wavelet szűrő esetén a határfrekvenciát meghatározó dekompozíciós szint meghatározása nagy megbízhatósággal automatizálható, míg a Fourier-transzformációs szűrő esetén ezt a beállítást csak manuálisan sikerült pontosan meghatározni, akkor általános felhasználás szempontjából is kijelenthető, hogy a meghatározott wavelet szűrő az optimális megoldás.

### 4.2 Ipari felhasználhatóság, jövőbeli tervek

A dolgozatban meghatározott digitális szűrő egy olyan mérő- és jelfeldolgozó rendszer legfontosabb egységét fogja képezni, mely képes becslést adni a detektált részkiülés térbeli pozíciójára. A meghatározott szűrő általános alkalmazhatóságának ellenőrzéséhez a módszer pontosságát további részkiülés források jeleivel is szükséges

tesztelni. A vizsgálandó források között szerepelnek eltérő geometriájú korona elektród párok, valamint üreg- és felületi kisülést keltő elrendezések is. A forrásokat az általános alkalmazhatóság megállapításához célszerű különböző AC és DC feszültség szintek és polaritások mellett is vizsgálni. A megfelelően pontos TDOA értékeket adó zajszűrő egységet tartalmazó teljes mérőrendszert végül különböző térbeli elrendezésű helymeghatározási problémák megoldásán is tesztelni kell.

Ha a rendszer minden felsorolt vizsgálatot sikeresen teljesített, alkalmassá válik az ipari helyszíni testüzemre. A transzformátorgyártás utolsó fázisában a kész berendezés szabványos villamos teszteken esik át, melyek során sor kerül a konvencionális részkisülés mérésre is, melynek segítségével a kisülés jelenléte detektálható, ilyen esetben pedig már a konvencionális mérés közben automatikusan indítható az automatizált helymeghatározó rendszer. A diagnosztikai mérőtérben kialakítható egy rögzített koordináta rendszer, valamint állandó jelleggel felhelyezhető több, ismert koordinátájú antenna is, melyek egyenletesen körülhatárolják a mérőtér térfogatát. Célszerű a szükséges 4 antennánál többet elhelyezni, így ugyanis a megfelelő 4 jel kiválasztásával számos különböző antenna elrendezés valósítható meg az antennák mozgatása nélkül, mellyel jelentősen pontosítható a becslés eredménye. Az ismert geometriájú transzformátort a mérőtér kijelölt, ismert koordinátájú pozíciójára helyezve lehetőség van egy háromdimenziós grafikus felület kifejlesztésére is. Ezen a felületen az adott transzformátor háromdimenziós modellje látható, valamint a geometrián belül megjelenítésre kerül a helymeghatározás eredménye is, mellyel így könnyedén azonosítható a berendezés hibás egysége.

A mérőrendszer gyártástechnológiába integrálhatóságának feltételét képezi az automatizált működés, ez ugyanis lehetővé teszi a mérőrendszer működését a konvencionális részkisülésdiagnosztikai méréssel párhuzamosan is. Az automatizált rendszer nem igényel a szakszemélyzet részéről a mérést meghosszabbító kapcsolási tevékenységeket, továbbá gyors futásának köszönhetően képes a szabványos mérés végére érve becslést adni a részkisülés pozíciójára. Összességében tehát egy ilyen rendszer nem lassítja a diagnosztikai vizsgálatot, részkisülés jelenléte esetén viszont kifejezetten felgyorsítja azt. Ez lehetővé teszi, hogy a berendezés hibás egysége rövid időn belül kicserélésre kerüljön, elkerülve a teljes berendezés esetleges selejtezését, ezzel gazdaságilag is hozzájárulva a gyártósor hatékonyságához.



## **Köszönetnyilvánítás**

Dolgozatom végére érve ezúton is szeretném kifejezni hálámat a **BME Nagyfeszültségű Laboratóriuma** vezetőjének, Dr. Németh Bálintnak, valamint helyettes vezetőjének, Cselkó Richárdnak, amiért a kutatás teljes időtartama alatt rendelkezésemre bocsátották a szükséges berendezéseket, továbbá segítségemre voltak a mérésekhez elengedhetetlen egyéb eszközök beszerzésében is.

Köszönöm továbbá a menyasszonyomnak, Ember Viktóriának, hogy türelmével támogatott, finom főztjével pedig életben tartott a „TDK hajrá” utolsó napjaiban.

# Ábrajegyzék

1. ábra: A dolgozatban vizsgált részkisülésforrás antennával mért jele .....	6
2. ábra: A helymeghatározási probléma térbeli modellje .....	8
3. ábra: Népszerű transzformációk összehasonlítása Heisenberg-dobozokkal.....	15
4. ábra: A gyors Wavelet-transzformáció dekompozíciós gráfja.....	17
5. ábra: A későbbiekben kiválasztott 7 legjobb eredményt adó wavelet függvényeinek szemléltetése .....	18
6. ábra: A vizsgált tú-sík kisülésforrás és az egyik alkalmazott antenna.....	20
7. ábra: Level 1 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei.....	21
8. ábra: Level 2 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei.....	22
9. ábra: Level 3 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei.....	22
10. ábra: Level 4 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei.....	23
11. ábra: Level 5 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei.....	23
12. ábra: Level 6 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei.....	24
13. ábra: Level 7 dekompozíciós szint vizsgálati eredményei.....	24
14. ábra: Vizsgálati eredmények összefoglalása wavelet típusok mentén történő átlagolással.....	25
15. ábra: Vizsgálati eredmények relatív változásainak szemléltetése a Level 1-es maximumokra normált értékek #1, #4, #5, #7 módszerek mentén történő átlagolásával .....	26
16. ábra: Vizsgálati eredmények wavelet típusától való függése a dekompozíciós szintek maximumaira normált átlagos normált értékek Level 1-5 szintek mentén történő átlagolásával.....	27
17. ábra: Vizsgálati eredmények javított összefoglalása a db3, db5, db9, sym3, sym4, coif1, coif5 wavelet típusok mentén történő átlagolással .....	28
18. ábra: A kiválasztott #1 módszer eredeti eredményeinek összefoglalása a dekompozíciós szint és a kiválasztott 7 wavelet típus függvényében .....	29
19. ábra: A kiválasztott #1 módszer átlagos szórásai és abszolút hibái közötti kapcsolat, változó dekompozíciós szint esetén.....	30
20. ábra: Az optimális Wavelet- és Fourier-transzformáció alapú szűrők összehasonlítása .....	31

## Irodalomjegyzék

- [1] IEC 60270:2000, “*High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*” (Standard), 2000
- [2] M. Szirtes and R. Cselkó, “*Evaluation of a measuring system determining the location of partial discharges,*” 8th András Mechwart Youth Meeting 2018, Visegrád, Hungary, 2018
- [3] B. G. Stewart, A. Nesbitt and L. Hall, “*Triangulation and 3D location estimation of RFI and Partial Discharge sources within a 400kV substation,*” 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, QC, 2009, pp. 164-168.
- [4] O. El Mountassir, B. G. Stewart, S. G. McMeekin and A. Ahmadinia, “*Effect of sampling rate on the location accuracy of measurements from radiated RF partial discharges signals,*” 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, 2012, pp. 891-896.
- [5] Y. Sun, B. G. Stewart and I. J. Kemp, “*Alternative cross-correlation techniques for location estimation of PD from RF signals,*” 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004., Bristol, UK, 2004, pp. 143-148 Vol.1.
- [6] Y. Lu, X. Tan and X. Hu, “*PD detection and localisation by acoustic measurements in an oil-filled transformer,*” in IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, vol. 147, no. 2, pp. 81-85, Mar 2000.
- [7] O. El Mountassir, B. G. Stewart, S. G. McMeekin and A. Ahmadinia, “*Effect of noise on the location accuracy of partial discharges using radiated RF detection techniques,*” 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), London, 2012, pp. 1-6.
- [8] A. Tungkanawanich, Z. I. Kawasaki, J. Abe and K. Matsuura, “*Location of partial discharge source on distribution line by measuring emitted pulse-train electromagnetic waves,*” 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077), 2000, pp. 2453-2458 vol.4.
- [9] A. Zaeni, T. Kasnalestari and U. Khayam, “*Application of Wavelet Transformation Symlet Type and Coiflet Type For Partial Discharge Signals Denoising,*” 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), Surakarta, Indonesia, 2018, pp. 78-82.
- [10] U. Khayam and T. Kasnalestari, “*System of wavelet transform on partial discharge signal denoising,*” 2016 2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE), Yogyakarta, 2016, pp. 79-83.
- [11] H. A. Vidya, V. Krishnan and K. Mallikarjunappa, “*A wavelet transform technique for de-noising partial discharge signals,*” 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, 2008, pp. 1104-1107.

- [12] B. Raghavendra and M. Krishna Chaitanya, "*Comparative analysis and optimal wavelet selection of partial discharge de-noising methods in Gas-insulated Substation*," 2017 Third International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), Chennai, 2017, pp. 1-5.
- [13] M. Lin, C. Tai, Y. Tang and C. Su, "*Partial discharge signal extracting using the empirical mode decomposition with wavelet transform*," 2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, Chengdu, 2011, pp. 420-424.
- [14] D. ZhaoHeng, L. ShangHe and W. Lei, "*Selection of the optimal wavelet bases for wavelet de-noising of partial discharge signal*," 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems, Dalian, 2010, pp. V3-400-V3-404.
- [15] P. Ray, A. Basuray and A. K. Maitra, "*Optimum wavelet bases selection for wavelet based de-noising in partial discharge measurement*," 2013 IEEE Conference on Information & Communication Technologies, Thuckalay, Tamil Nadu, India, 2013, pp. 1110-1113.