



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

CTX9GE

**Részkisülést detektáló és térben lokalizáló
mérési rendszer fejlesztése**

TDK dolgozat

Konzulens:

Cselkó Richárd

egyetemi tanársegéd

Villamos Energetika Tanszék

Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport

BUDAPEST, 2017

ÖSSZEFOGLALÓ

Dolgozatom témája a részkisülések térbeli helyzetének meghatározása, kibocsátott elektromágneses jelek mérésén keresztül.

Napjainkban a nagyfeszültségű berendezések üzembe helyezés előtti átvételi, illetve használat közbeni diagnosztikai vizsgálatain során hangsúlyos szerepet kap a részkisülésvizsgálat is, hisz a kisülések időben történő detektálásával megelőzhetők a későbbi költséges meghibásodások. A részkisülések érzékelésére, vizsgálatára jól bevett, kipróbált módszerek állnak rendelkezésre [10], azonban a pontos helyzetük meghatározására nincs általánosan használatban lévő technika, pedig egy ilyen célra kialakított rendszerrel jelentősen felgyorsítható a hibák megtalálásának procedúrája.

Kutatásom során számos, a témával foglalkozó esettanulmányt néztem át, kigyűjtve az alkalmazott módszereket, melyek közül az ígéretesebbeket MATLAB környezetben implementáltam is. Kombinálva és kiegészítve ezen módszereket, alternatívákat alkottam a szakirodalmakban szereplő technikákra, azzal a céllal, hogy a helymeghatározás kérdését ezzel új nézőpontba helyezzem.

Mindezzel egy olyan mérőrendszer megalkotását kívánom megalapozni, melyet ipari környezetben is megbízhatóan lehet alkalmazni nagyfeszültségű berendezések üzembe helyezés előtti rutinvizsgálatain során. A dolgozatban már szerepel ennek a mérőrendszernek a legelső verziója, mely offline módon ad becslést a részkisülés térbeli helyzetére. Jövőbeli terveim között szerepel a rendszert online, valós idejű helymeghatározásra is képessé tenni, hogy a méréssel párhuzamosan futva, a program a mérés végére pontos eredményt adjon. Távlabbi terveim között szerepel a rendszer alkalmazhatósági körének kiterjesztése nagyfeszültségű alállomások működésben levő berendezéseire is, amihez a részkisülésfizika zajszűrésbe való integrálására is szükség lesz.

A dolgozatban a részkisülések elméleti bevezetőjét követően ismertetem a helymeghatározás matematikai problémáját, továbbá leírom a mérőrendszerembe beépített módszerek működését, kitérve az általam alkalmazott fejlesztésekre is. A dolgozat második felében különféle mérési elrendezéseken tesztelem a kialakított mérőrendszert, pontossága megállapítása érdekében. A befejező szakaszban a mérési eredmények átfogó értékelését követően, a dolgozatot a mérőrendszerrel kapcsolatos jövőbeli kutatási és fejlesztési terveim ismertetésével zárom.

ABSTRACT

The topic of my study is the spatial localization of partial discharges using antenna measurements of their emitted electromagnetic signals.

Nowadays, partial discharge tests have an important role in the acceptance tests and on-site diagnostic examinations of high voltage equipment, because later occurring costly malfunctions can be prevented by detecting the discharges in time. For the detection and examination of partial discharges, well defined and tested methods are available [10], however there is no generally accepted technique for the determination of their accurate location, even though a system, created for such use, would significantly speed up the procedure of finding faults.

During my research, I have reviewed numerous case studies regarding this topic, making a collection of the applied methods, from which I have implemented the promising ones in MATLAB environment. By combining and complementing these methods, I have created alternatives for the techniques described in the literature, aiming to put the topic of location determination in a new perspective.

With all this, I wish to blaze a trail for the creation of a measuring system, which can be applied reliably in industrial environment, during the before-startup routine inspections of high voltage equipment. This study presents the very first version of this measuring system, which provides an offline approximation for the spatial location of the partial discharge. One of my future plans is to make the system capable of online, real-time localization, so the program, running in parallel with the measurements, would provide an accurate result by the end of the measuring cycle. My further plan is to expand the system's field of application to the operating equipment of high voltage substations, for which, the integration of partial discharge physics into noise filtering will be needed.

In this study, following the theoretic introduction of partial discharges, I present the mathematical problem of localization and show the operation of the methods, implemented in my measuring system, along with my own applied improvements. In the second half of the study, I test the created measuring system with different measurement arrangements, to determine the accuracy of it. In the final section, after the comprehensive evaluation of the measurement results, I finish the study by presenting my future research and development plans for the measuring system.

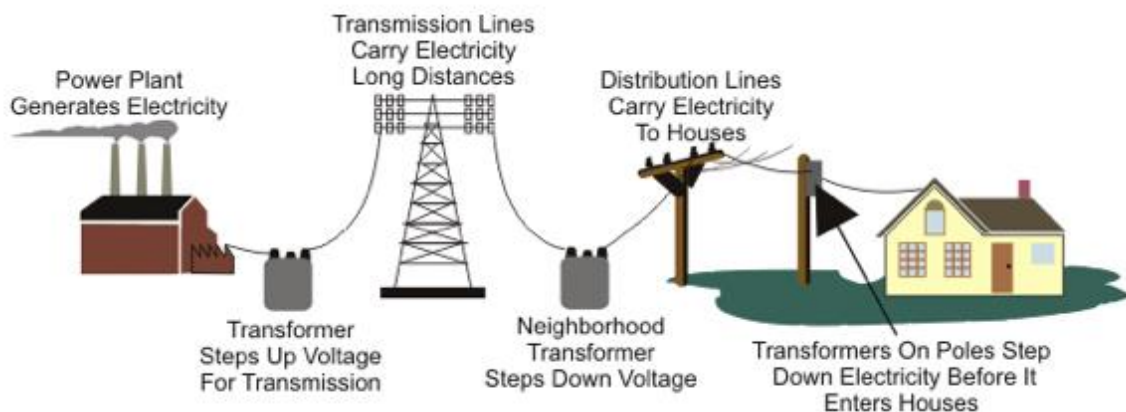
TARTALOMJEGYZÉK

Összefoglaló.....	2
Abstract	3
Tartalomjegyzék	4
1 Bevezető, a téma fontossága	5
2 A részkisülés	6
3 A helymeghatározás matematikája.....	8
3.1 Alapprobléma.....	8
3.2 Időkülönbségek számítása.....	10
3.2.1 Pontosságot befolyásoló tényezők	10
3.2.2 Hasznos jel kezdetének megtalálása	11
3.2.3 TDOA meghatározása keresztkorrelációval	14
3.3 Helymeghatározó algoritmus	16
4 A mérőrendszer megvalósítása és tesztelése	19
4.1 Felépítés és működés.....	19
4.2 Saját fejlesztések	24
4.2.1 Zajsűrés.....	24
4.2.2 Időkülönbségek meghatározása.....	27
4.3 Pontosság tesztelése.....	29
4.3.1 Kísérleti elrendezések	29
4.3.2 Mérési eredmények.....	33
4.4 Mérési eredmények értékelése	39
5 Ipari felhasználhatóság, jövőbeli tervek.....	40
6 Köszönetnyilvánítás.....	42
7 Ábra-, egyenlet- és táblázatjegyzék.....	43
7.1 Ábrajegyzék	43
7.2 Egyenletjegyzék.....	44
7.3 Táblázatjegyzék	45
8 Források	46

1 BEVEZETŐ, A TÉMA FONTOSSÁGA

Napjaink társadalma egyre növekvő mértékben támaszkodik a villamos energiára, a technológiai újítások pedig az elektromosság egyre tágabb körű felhasználása felé mutatnak, ami tovább növeli az ellátás megbízhatóságától való függésünket. A hétköznapi ember számára a villamosság rendelkezésre állása egy természetes dolog, és már egy rövidebb áramkimaradás is elégedetlenségre adhat okot, nem beszélve a különféle üzemekről, ahol a termeléskimaradás komoly anyagi veszteséggel jár. Az üzemekhez hasonlóan magának a szolgáltatóknak is vesztesége származik abból, ha adott ideig nem szolgáltatathat villamos energiát a fogyasztóknak. Ezen okok együtteséből következik, hogy a villamosenergia-ipar legfontosabb célkitűzése a folyamatos és megbízható energiaellátás biztosítása.

Az erőművek generátoraiban termelt villamos energiát először nagyfeszültségre transzformálják a szállítás során fellépő hőveszteség csökkentésére. Ezt követően az átviteli hálózat több kilométer hosszú nagyfeszültségű távvezetékei szállítják a villamos energiát az elosztó hálózat határáig, ahol további transzformátorokon keresztül a fogyasztók igényeinek megfelelő feszültségszintre letranszformálják azt.



1. ábra: A villamosenergia-rendszer három fő egysége: termelés, szállítás, elosztás [1]

A villamosenergia-rendszer legfontosabb berendezései a transzformátorok, melyek esetleges meghibásodásainak hátterében általában valamilyen érintkezési vagy szigetelési hiba áll. Nagyfeszültségű környezetben egy ilyen rendellenesség a hibahelyen fellépő részkisülést (PD – partial discharge) okoz, mely ellenintézkedések nélkül fokozatosan csökkenti a környező szigetelőanyagok villamos szilárdságát.

Ha a szigetelőanyag villamos szilárdsága egy adott érték alá csökken, átütés következik be, mely igen költséges károkat okozhat a transzformátorban és környezetében, továbbá fogyasztók tömegei maradhatnak energiaellátás nélkül, ami további anyagi veszteséget jelent. A villamos energia minősége tehát közvetlenül függ a szállításában résztvevő berendezések állapotától és megbízhatóságától, melynek biztosításához rendszeres vizsgálatokra és az eszközök karbantartására van szükség.

A legtöbb komoly meghibásodás megelőzhető, ha az azt megelőző részkisüléseket időben detektáljuk és helyzetük ismeretében javítjuk az okozó hibát. A részkisülések egyaránt keltenek vezetett elektromos, hang útján terjedő mechanikai, illetve sugárzott elektromágneses zavarokat, melyek mérését alapul véve különféle kísérleti módszerek léteznek a PD helyzetének meghatározására. Kutatásom során az elektromágneses jelek mérésén alapuló módszereket tanulmányoztam, és a szerzett információt felhasználva összeállítottam egy mérőrendszert, melynek segítségével meghatározhatók a részkisülés koordinátái egy rögzített koordináta-rendszerben.

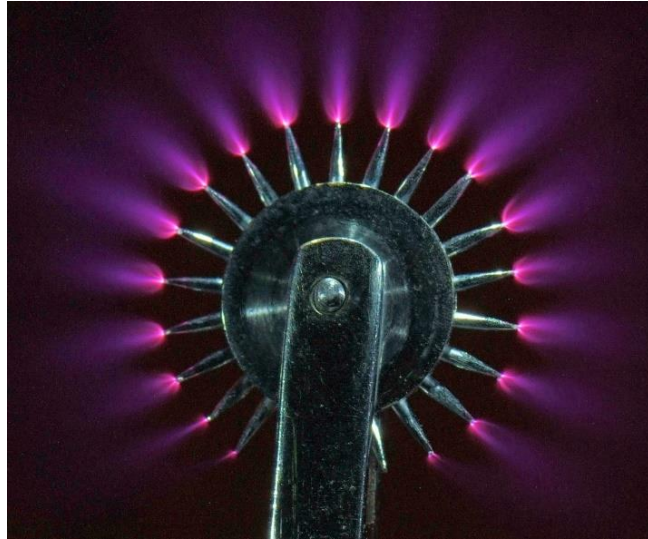
Dolgozatomban a részkisülések rövid elméleti áttekintését követően ismertetem a helymeghatározás matematikai problémáját és az általam felhasznált, illetve kifejlesztett módszereket. Ezt követően a mérőrendszer pontosságát különféle elrendezésekre tesztelem, a kapott eredmények kiértékelése után pedig ismertetem a témával kapcsolatos jövőbeli terveimet, és kitérek a mérőrendszer lehetséges ipari alkalmazásaira is.

2 A RÉSZKISÜLÉS [2]

Erősen inhomogén villamos erőtér esetén jöhet létre az úgynevezett részkisülés vagy részletörés, ahol a szigetelőanyag a nagy térerősség következtében lokálisan elveszíti szigetelőképességét. A térerősség növelésével vagy a szigetelőanyag villamos szilárdságának csökkenésével a részkisülést átütés vagy átívelés váltja fel.

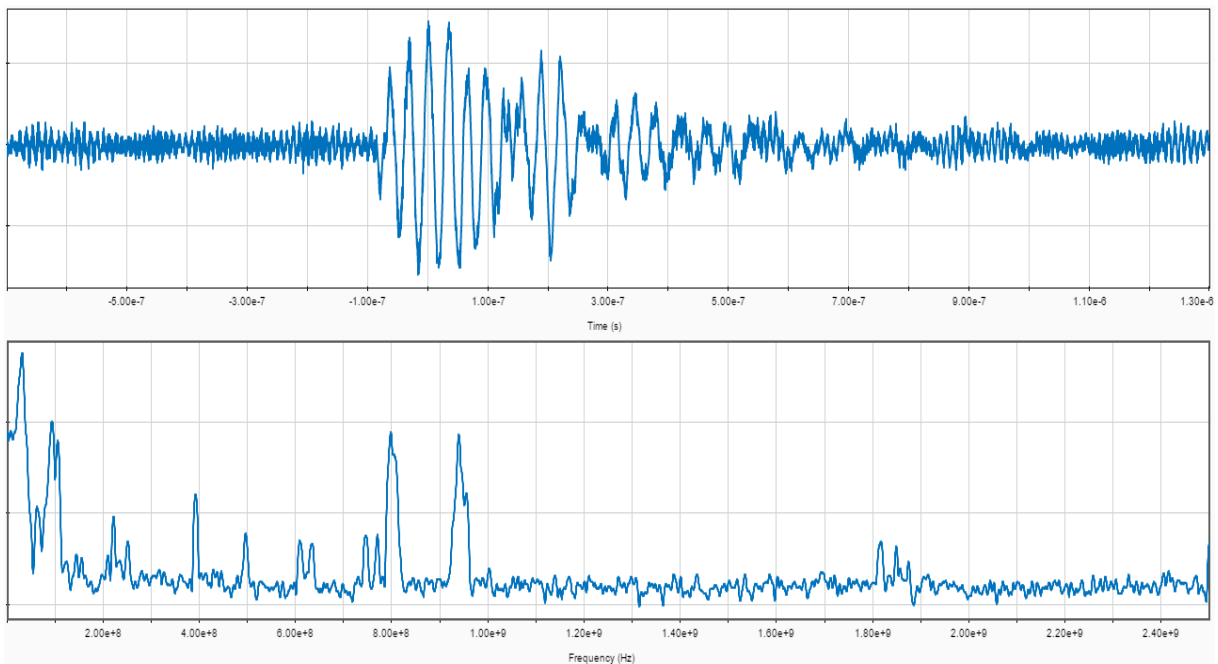
A részkisüléseket négy kategóriába sorolhatjuk a szigetelőanyagok egymáshoz képest való elhelyezkedése és halmazállapota alapján. Az első típus a kis görbületes sugárú elektród körül gázokban létrejövő koronakisülés. Ha a részkisülés két különböző szigetelőanyag határfelületén jön létre, felületi- vagy kúszó kisülésről beszélünk.

A harmadik kategória a szilárd vagy folyékony halmazállapotú szigetelők belsejében található zárványokban, gázbuborékokban létrejövő belső- vagy üregkisülés. A részletörés negyedik esete a szilárd szigetelőanyag belsejében lassan tovaterjedő kisülés, amit az angolszász szaknyelvből átvéve treeingnek nevezünk.



2. ábra: Koronakisülések egy Wartenberg kerék tűinek csúcsainál [3]

A dolgozatban szereplő kísérleti elrendezéseim során egy erre alkalmas tű-sík elektródpárral hoztam létre koronakisülést. Egy ilyen kisülés által sugárzott elektromágnes zavart antennával mérve a **3. ábra** szerinti feszültségjelet és spektrumot kapjuk.

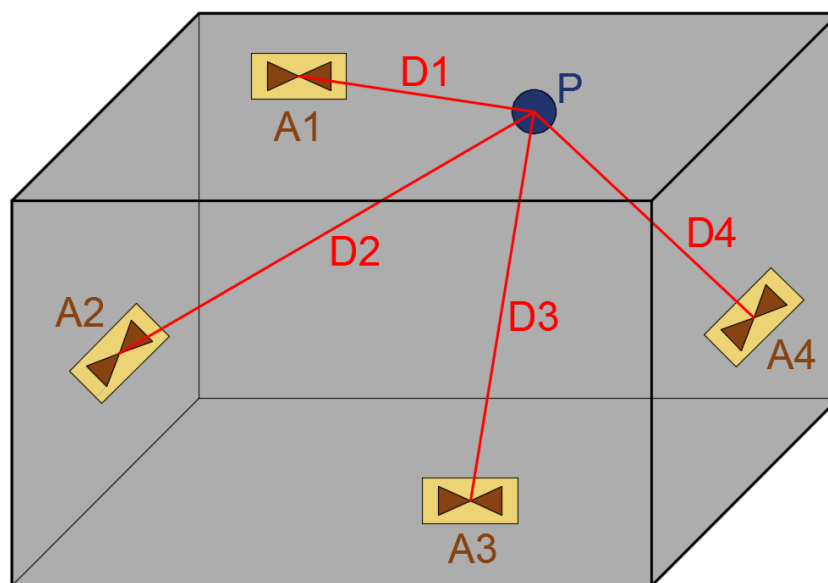


3. ábra: Antennával mért részkisülés jelalakja (felül) és spektruma (alul)

3 A HELYMEGHATÁROZÁS MATEMATIKÁJA

3.1 ALAPPROBLÉMA [4]

A 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. Ennek a problémának a térbeli modelljét szemlélteti a **4. ábra** és az **1. egyenlet**.



4. ábra: A helymeghatározás alapproblémájának modellje: részkisülés (P), antennák (A), távolságok (D)

1. egyenlet: Antennák és részkisülés koordinátái

$$A1 = (x1, y1, z1)$$

$$A2 = (x2, y2, z2)$$

$$A3 = (x3, y3, z3)$$

$$A4 = (x4, y4, z4)$$

$$P = (x, y, z)$$

Egy mérés során a vett jelekből kinyerhető, számunkra hasznos információ a jelek beérkezései között eltelt idő (TDOA – time difference of arrival), tehát az, hogy mennyivel vannak egymáshoz képest eltolódva időben. Fontos megjegyezni, hogy a forrás és a szenzor közti távolság megállapításához a két pont közti jelterjedési idő

(TOF – time of flight) ismeretére lenne szükség, nekünk viszont csak ezen idők különbségei állnak rendelkezésünkre.

A probléma megoldásához kiválasztunk egy referencia antennát (A1), és bevezetünk egy ismeretlen T_1 -et, ami a referencia antennához tartozó TOF értékét képviseli. A további antennákhoz úgy definiáljuk a TDOA értékeket, hogy az megmutatja, mennyivel később érkezett a jel az adott antennához, mint A1-hez (az A1-hez tartozó TDOA tekinthető nullának). Ezt írja le a **2. egyenlet** és szemlélteti az **5. ábra**.

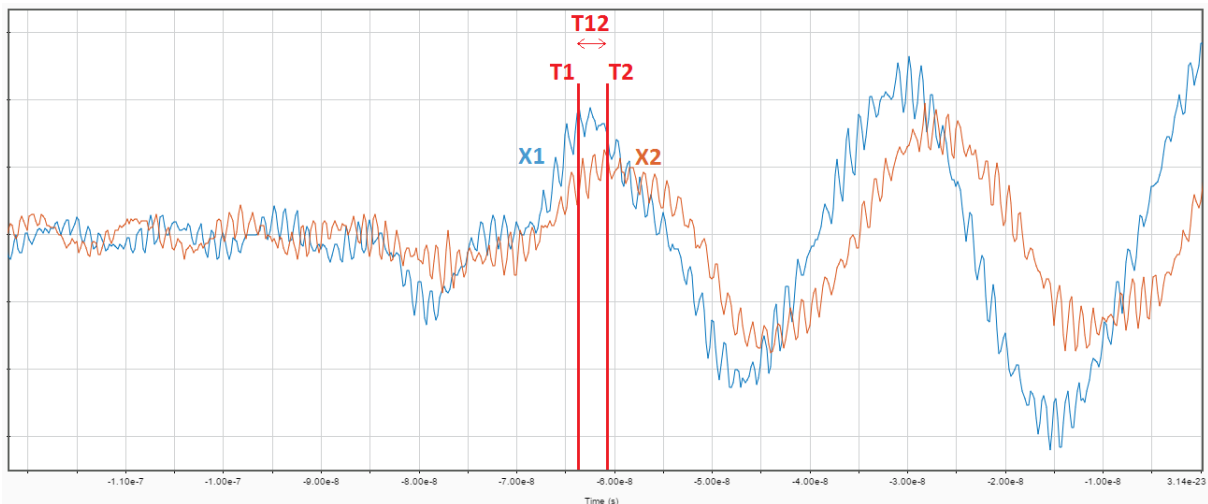
2. egyenlet: TDOA értékek a megfelelő TOF-ek különbségeként

$$T_{12} = T_2 - T_1$$

$$T_{13} = T_3 - T_1$$

$$T_{14} = T_4 - T_1$$

$$(T_{11} = 0)$$



5. ábra: TDOA szemléltetése 2 antenna szűretlen jelével

Ezek alapján az antennákhoz tartozó TOF értékek előállnak T_1 és az adott TDOA összegeként. Ezt követően a PD-től számított távolság antennánként felírható egyenlete a közismert $D = c \cdot T$ fizikai összefüggésből adódik, ahol D a kérdéses távolság, T az antennához tartozó TOF, c pedig az elektromágneses hullámok terjedési sebessége a közegben – jelen vizsgálataim során a levegőben.

T_1 bevezetésével ismeretlenjeink száma négyre nőtt, így az egyenletrendszer megoldásához legalább négy egyenletre van szükség, ez pedig legalább négy antennát jelent. Az így kapott egyenletrendszert a **3. egyenlet** írja le.

3. egyenlet: A helymeghatározás problémáját leíró egyenletrendszer

$$D_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} = c \cdot T_1$$

$$D_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} = c \cdot (T_1 + T_{12})$$

$$D_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} = c \cdot (T_1 + T_{13})$$

$$D_4 = \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2} = c \cdot (T_1 + T_{14})$$

$$\left(c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

3.2 IDŐKÜLÖNBSÉGEK SZÁMÍTÁSA

3.2.1 Pontosságot befolyásoló tényezők

Ahogy azt a **3. egyenlet** is mutatja, az egyenletrendszer megoldásához az antennák koordinátáinak ismeretén túl szükség van a megfelelő TDOA értékekre is, melyekre a különféle helymeghatározó algoritmusok egytől-egyig alapvetően támaszkodnak, ugyanis eredményük pontossága döntő mértékben függ az időkülönbségek meghatározásának pontosságától.

A TDOA értékek az antennák oszcilloszkóppal mért jeleiből számíthatók ki, így az oszcilloszkóp mintavételi frekvenciája felső határt szab a kapott értékek pontosságának. Mivel már **1 ns** időmérési hiba is **30 cm** távolságkülönbséget eredményez, ezért a helymeghatározási probléma megoldásához **GSa/s** nagyságrendű mintavételi frekvenciára van szükség.

Ideális esetben (zaj és csillapodás nélkül) az antennák által vett jelek (x) a referencia antenna (A1) jelének időben késleltetett változatai, ahogy azt a **4. egyenlet** is mutatja.

4. egyenlet: A négy antenna idealizált jelének kapcsolata

$$x_2(t) = x_1(t - T_{12})$$

$$x_3(t) = x_1(t - T_{13})$$

$$x_4(t) = x_1(t - T_{14})$$

A valóság azonban ettől jelentős mértékben eltér, ugyanis a jel intenzitása a forrástól mért távolság négyzetével arányosan csökken, illetve a jeltovábbító közeg az elektromágneses jel elnyelődési és szóródási folyamatain keresztül további csillapító hatással lehet a mérendő jelre. Az antenna által vett jelet egy több méter hosszú koaxiális kábelén keresztül továbbítjuk az oszcilloszkópig, melynek ilyen hosszúságnál már szintén jelentős csillapító hatása lehet. Ez a csillapítás valamilyen mértékben frekvenciafüggő, illetve reflexiók is létrejöhetnek a kábel végződéseinél, így a jel alakja is torzulhat mire elér az oszcilloszkópig.

További problémát jelent a külső zajok megjelenése, melyek egy részét az antenna veszi a hasznos jellel együtt, ennél azonban nagyobb problémát jelent, ha maga a kábel is, kellő árnyékolás hiányában antennaként viselkedik. A kábel által esetlegesen vett, illetve a tereptárgyakról visszaverődve több úton, különböző időpontokban beérkező jel azt eredményezheti, hogy a jelnek egy önmagával többszörösen interferálódott verzióját mérjük az oszcilloszkóppal.

Mindebből az következik, hogy a feldolgozandó jeleink csillapítottak, zajjal terheltek és jelalakjuk is valamekkora mértékben torzult, mely jelentősen megnehezíti a TDOA értékének pontos meghatározását. A probléma azonban enyhíthető, ha megfelelő árnyékolású, kellően alacsony csillapítású kábelt használunk, továbbá a mért jelet a számítógépes feldolgozás során előszűrjük.

3.2.2 Hasznos jel kezdetének megtalálása [5] [6] [7] [8]

A TDOA-k értékének meghatározására többféle módszer létezik, melyek két fő csoportba sorolhatók. Az első csoport technikai a hasznos 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. Ebben a fejezetpontban az első csoportba tartozó módszereket ismertetem, melyekkel meghatározható a jel kezdetének időpontja.

A hasznos jel kezdete meghatározható úgy, hogy kiválasztunk egy küszöbértéket, majd azt az időpontot tekintjük a kezdésnek, amikor a jel első alkalommal lépi túl ezt a feszültség szintet. A küszöbérték lehet adott százalékkal a jelet közvetlenül megelőző **zaj csúcsértéke fölé specifikált érték [5]**, vagy a **jel csúcsértékének adott**

hányadaként kapott feszültség szint. A küszöbérték átlépésének meghatározásához viszont célszerű a jel helyett egy abból képzett energia jellegű függvényt létrehozni, mely csökkentheti a zajból és a jel sztochasztikus jellegéből fakadó pontatlanságokat. Ilyen például az **5. egyenlet** szerint képzett, **pillanatnyi jelenergiát** megjelenítő függvény [6], vagy a **6. egyenlet** szerinti működésű, **N** adatpont széles **csúszó ablakú, energia-ablakozó** (energy windowing) függvény [7]. Ez a függvény egyfajta átlagolást végez a jelen, ideálisabbá téve azt a további feldolgozáshoz.

5. egyenlet: Pillanatnyi jelenergia (diszkrét)

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

6. egyenlet: Energia-ablakozó függvény (diszkrét)

$$E_{\text{ablak}}[k] = \sum_{k_0=1}^N [(x[k + k_0])^2]$$

A negyedik módszer az úgynevezett **kumulatív energia görbét** (cumulative energy curve) használja. [8] A görbét a **7. egyenlet** definiálja, ahol **N+1** jelöli a diszkrét jel adatpontjainak számát, **S_i** az **x** jel *i*-edik időpillanathoz tartozó kumulatív energiáját, **x_k** pedig a jel *k*-edik időpillanatban felvett értékét.

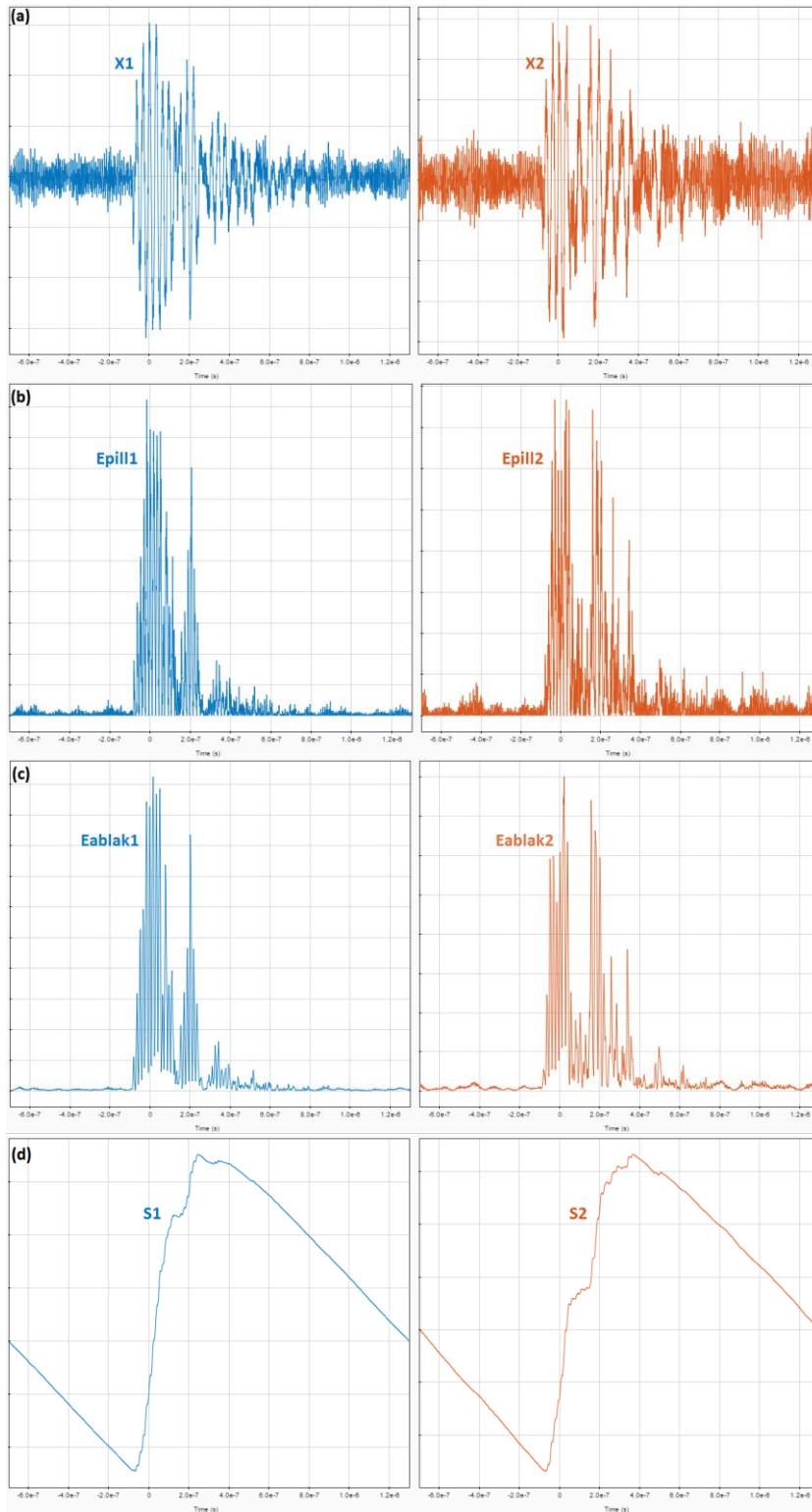
7. egyenlet: Kumulatív energia görbe (diszkrét)

$$S[i] = S_i - i \cdot \frac{S_N}{N}$$

$$\left(S_i = \sum_{k=0}^i [x_k^2]; i = 0, 1, 2, \dots, N \right)$$

A görbe definíciójából látható, hogy míg nincs hasznos jel, 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 0-ból indulva egészen a hasznos jel kezdetéig csökken, majd a hasznos jel alatt nő, a jel vége után pedig ismét csökken egészen nulláig. Ez azt jelenti, hogy a görbe minimumhelye megegyezik a hasznos jel kezdeti idejével.

Az ismertetett energia jellegű függvényeket a **6. ábra** mutatja be.



6. ábra: Szűretlen PD jelek (a), Pillanatnyi jelenergia (b), Energia-ablakozó függvény (c), Kumulatív energia görbe (d)

3.2.3 TDOA meghatározása keresztkorrelációval [5] [9] [11] [12]

Ebben a fejezetpontban a keresztkorrelációs függvényt és annak a TDOA számítás során történő alkalmazását mutatom be. A bemutatott módszerekkel a keresett időkülönbség közvetlenül meghatározható.

A keresztkorrelációs függvény két jel hasonlóságát mutatja meg az egymáshoz viszonyított időbeli eltolás függvényében. [5] [9] A függvény definícióját a 4 antenna jeleire a **8. egyenlet** mutatja, ahol az első és az n -edik ($n=2,3,4$) antenna jelének r_{x1xn} keresztkorrelációs függvényét az n -edik jel τ mértékű balra tolásán keresztül kapjuk. Az egyenletekben N a diszkrét jel adatpontjainak számát jelöli. Egy jel önmagával vett keresztkorrelációját **autokorrelációnak** nevezzük.

8. egyenlet: Keresztkorrelációs függvény a 4 antenna jelére (diszkrét)

$$r_{x1x2}[\tau] = \sum_{t=0}^{N-1-\tau} [x1[t] \cdot x2[t + \tau]]$$

$$r_{x1x3}[\tau] = \sum_{t=0}^{N-1-\tau} [x1[t] \cdot x3[t + \tau]]$$

$$r_{x1x4}[\tau] = \sum_{t=0}^{N-1-\tau} [x1[t] \cdot x4[t + \tau]]$$

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

Jól látható, hogy az $x1$ -hez képest alapvetően késő xn jelet pontosan $T1n$ értékkel „siettetve” a két összeszorozott jel azonos lesz, így ekkora eltolás esetén r_{x1xn} maximális értéket fog felvenni. Ez azt jelenti, hogy a keresztkorrelációs függvény maximum helyének meghatározása a TDOA kiszámításával egyenértékű feladat.

A fenti függvények meghatározhatók a jelek Fourier-transzformáltjaiból is a **9. egyenlet**ben leírtak szerint, ahol $F\{.\}$ jelöli a diszkrét jel Gyors Fourier-Transzformáltját (Fast Fourier-Transform – FFT), $F^{-1}\{.\}$ ennek az inverzét (IFFT), a csillag (*) pedig a komplex konjugálást. A keresztkorrelációs függvény Fourier-Transzformáltját **kereszt teljesítmény spektrumnak**, az autokorrelációs függvényét pedig **teljesítménysűrűség spektrumnak** nevezzük.

9. egyenlet: Keresztkorreláció meghatározása frekvencia tartományban

$$r_{x_1x_2}[\tau] = F^{-1}\{X_1^*(f) \cdot X_2(f)\}$$

$$r_{x_1x_3}[\tau] = F^{-1}\{X_1^*(f) \cdot X_3(f)\}$$

$$r_{x_1x_4}[\tau] = F^{-1}\{X_1^*(f) \cdot X_4(f)\}$$

$$(X_n(f) = F\{x_n[k]\}; \quad n = 1, 2, 3, 4)$$

A keresztkorrelációs függvényre nyújt alternatívát a frekvencia tartományban értelmezett **koherencia függvény Inverz Fourier-Transzformáltja**. [11] [12] Ezt mutatja be a **10. egyenlet**, ahol $\gamma(f)$ a koherencia, \mathbf{G} pedig indextől függően a kereszt teljesítmény spektrum, vagy a teljesítménysűrűség spektrum. A teljesítménysűrűség spektrum valós értékeket vesz fel, így értelmezhető annak gyöke is.

10. egyenlet: Koherencia függvény definíciója (frekvencia tartomány)

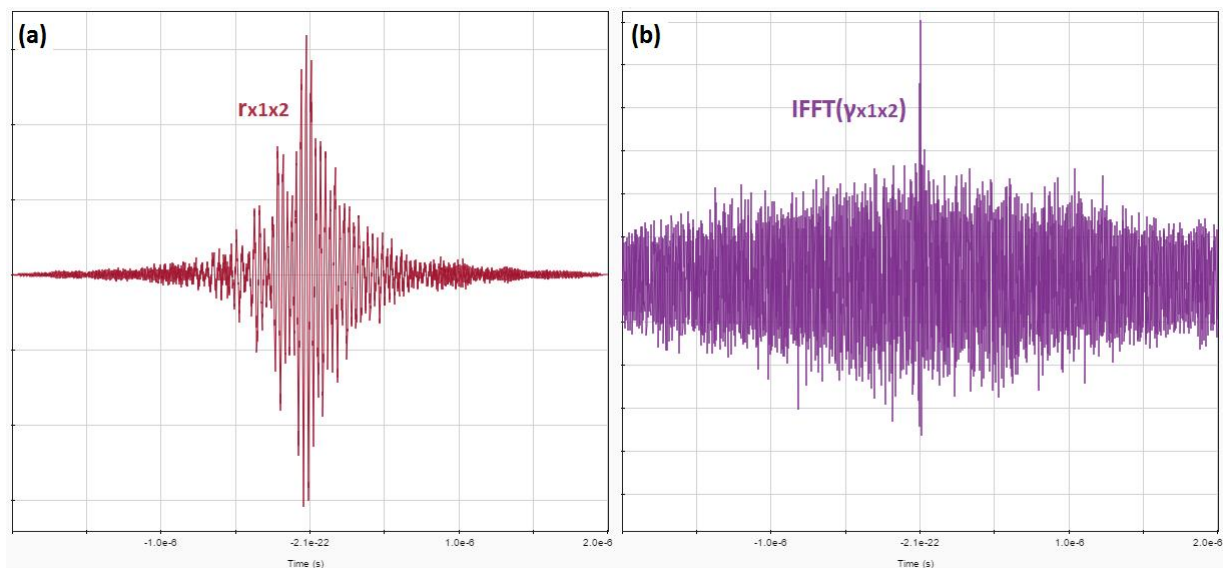
$$\gamma_{x_1x_2}(f) = \frac{G_{x_1x_2}(f)}{\sqrt{G_{x_1x_1}(f) \cdot G_{x_2x_2}(f)}}$$

$$\gamma_{x_1x_3}(f) = \frac{G_{x_1x_3}(f)}{\sqrt{G_{x_1x_1}(f) \cdot G_{x_3x_3}(f)}}$$

$$\gamma_{x_1x_4}(f) = \frac{G_{x_1x_4}(f)}{\sqrt{G_{x_1x_1}(f) \cdot G_{x_4x_4}(f)}}$$

$$(G_{x_ax_b}(f) = X_a^*(f) \cdot X_b(f); \quad a, b = 1, 2, 3, 4)$$

A két ismertett függvényt a **7. ábra** mutatja be a **6. ábra** szűretlen jeleire.



7. ábra: Keresztkorrelációs függvény (a), Koherencia függvény IFFT-je (b)

3.3 HELYMEGHATÁROZÓ ALGORITMUS [7] [13]

Ebben a fejezet részben bemutatom a helymeghatározási probléma leírása során kapott egyenletrendszer megoldásának egyik, számomra legpraktikusabb módját. Az átláthatóság kedvéért megismétlem a megoldandó egyenletrendszert a **11. egyenletben**.

11. egyenlet: A helymeghatározás problémáját leíró egyenletrendszer (ismétlés)

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

Irodalomkutatásom során több, az egyenletrendszer megoldását szolgáló alternatív módszert is tanulmányoztam. Mivel az egyenletrendszer nem megoldható analitikus úton, így a szakirodalmak többnyire valamilyen iteratív módszert alkalmaznak. [4] [5] [7] [8] [14] [15] [16] [17] [18] Ezek a módszerek a probléma nemlineáris volta miatt nem mindig adnak konvergens eredményt, továbbá nagyon lassan közelítenek a megoldáshoz, így a megbízható pontosságú végeredményhez rengeteg iterációra, tehát hosszas számításokra van szükség. Említést igényel továbbá a tény, hogy az iteratív módszerek alkalmazása során kapott, konvergens megoldás esetén sem lehetünk biztosak abban, hogy a kapott értékek helyesek. Ennek ellenőrzéséhez több mérést kell végezni, az eredményeket pedig össze kell hasonlítani, ami megsokszorozza a már eleve nagy számítási időt.

Ezen okokból a választásom végül egy **mintafelismerésen** (pattern recognition) alapuló, **nem-iteratív** módszerre esett. [7] [13] Ehhez az algoritmushoz először meg kell határozni egy téglatestnyi térfogatot, ahol a jelforrást keressük. Ez általában nem okoz problémát, mivel a hagyományos részkisülésmérő módszerekkel megállapítható, hogy melyik eszköz vagy eszközcsoport okozza a részkisülést, ezek pedig térben körülhatárolhatók.

A kiválasztott térrészt ezután általunk választott sűrűséggel elhelyezkedő, egymástól azonos távolságra levő térbeli pontokra osztja fel az algoritmus. A módszer

működésének értelmezéséhez vegyük például a k indexű, (x_k, y_k, z_k) koordinátákkal rendelkező térbeli pontot. A ponthoz meghatározásra kerül egy háromelemű **referencia mintavektor** (f_k), mely az adott térbeli pont és rendre a 2-es, 3-as és 4-es antennák közötti térbeli távolságokat ($D_{2,k}, D_{3,k}, D_{4,k}$) tartalmazza. Az algoritmus továbbá kiszámolja az 1-es referencia antennához tartozó **jelterjedési időt** is az adott ponttól számítva ($T_{1,k}$). Ezeket a számításokat a **12. egyenlet** mutatja be. A kiszámított értékek a teljes vizsgált térfogat minden kiválasztott pontjára változatlanok maradnak a mérések során.

12. egyenlet: A k indexű térbeli pont referencia mintavektora és az 1-es antennához tartozó jelterjedési ideje

$$f_k = (D_{2,k}, D_{3,k}, D_{4,k})$$

$$T_{1,k} = \frac{\sqrt{(x_k - x_1)^2 + (y_k - y_1)^2 + (z_k - z_1)^2}}{c}$$

$$\begin{pmatrix} D_{2,k} = \sqrt{(x_k - x_2)^2 + (y_k - y_2)^2 + (z_k - z_2)^2} \\ D_{3,k} = \sqrt{(x_k - x_3)^2 + (y_k - y_3)^2 + (z_k - z_3)^2} \\ D_{4,k} = \sqrt{(x_k - x_4)^2 + (y_k - y_4)^2 + (z_k - z_4)^2} \end{pmatrix}$$

Ezt követően az algoritmus a mérésenként kapott három TDOA érték (T_{12}, T_{13}, T_{14}) és az előzetesen kiszámolt, 1-es antennához tartozó jelterjedési idő ($T_{1,k}$) alapján az adott pontra kiszámol egy **mérésfüggő mintavektort** (f_k^0), ahogy azt a **13. egyenlet** is mutatja. A mérésfüggő mintavektor a már kiszámolt referencia mintavektorhoz hasonlóan szintén a 2-es, 3-as és 4-es antennákhoz tartozó távolságértékeket tartalmazza, azzal a különbséggel, hogy értéke mérésenként változik a kapott TDOA értékektől függően.

13. egyenlet: A k indexű térbeli pont mérésfüggő mintavektora

$$f_k^0 = (D_{2,k}^0, D_{3,k}^0, D_{4,k}^0)$$

$$\begin{pmatrix} D_{2,k}^0 = c \cdot (T_{1,k} + T_{12}) \\ D_{3,k}^0 = c \cdot (T_{1,k} + T_{13}) \\ D_{4,k}^0 = c \cdot (T_{1,k} + T_{14}) \end{pmatrix}$$

Az algoritmus következő lépése, hogy mérésenként összehasonlítja az állandó értékű referencia mintavektorokat a mérésfüggő mintavektorokkal a vizsgált térfogat minden kiválasztott pontjára. Ez úgy történik, hogy minden vizsgált térbeli pontra

kiszámításra kerül a mérésfüggő- és a referencia **mintavektorok relatív távolsága** a **14. egyenletben** leírtak szerint.

14. egyenlet: A **k** indexű térbeli pont mérésfüggő- és referencia mintavektorának relatív távolsága

$$d(k) = d(\mathbf{f}_k^0, \mathbf{f}_k) = \sqrt{\left(\frac{D_{2,k}^0 - D_{2,k}}{D_{2,k}^0}\right)^2 + \left(\frac{D_{3,k}^0 - D_{3,k}}{D_{3,k}^0}\right)^2 + \left(\frac{D_{4,k}^0 - D_{4,k}}{D_{4,k}^0}\right)^2}$$

Minél kisebb mintavektor távolságot kapunk egy adott pontra, annál jobban hasonlítanak egymásra az előre kiszámolt és a mérésből meghatározott jelforrás-antenna távolságok, ami azt jelenti, hogy a vizsgált pont koordinátái közel vannak a valódi jelforrás koordinátáihoz.

Ennek megfelelően az algoritmus növekvő sorrendbe rendezi a vizsgált pontok mintavektor távolságait, majd kiválasztja azokat, melyek nem haladják meg a legkisebb érték (\mathbf{d}_{\min}) adott százalékaként kapott **referencia távolságértéket** (\mathbf{d}_{ref}). Az így kiválasztott alacsony távolságértékekhez tartozó koordinátákat elég jónak tartjuk a jelforrás helyzetének közelítéséhez, így az algoritmus a végső becsült pozíció koordinátáit ezen pontok koordinátáinak átlagaként szolgáltatja. Ezt a végső lépést mutatja be a **15. egyenlet**.

15. egyenlet: A mintafelismerő helymeghatározó algoritmus végső becslése

$$P_{\text{becsült}} = \begin{pmatrix} \text{átlag}(x_k) \\ \text{átlag}(y_k) \\ \text{átlag}(z_k) \end{pmatrix}$$

(Minden olyan **k** indexre, ahol:)
 $(\mathbf{d}(k) \leq \mathbf{d}_{\text{ref}} (= \delta \cdot \mathbf{d}_{\min}); \quad \delta \geq 1)$

Az algoritmus legnagyobb pozitívuma, hogy nem-iteratív módszerként nem igényel nagymértékű számítási időt, illetve a számításigényes referencia mintavektort is csak egyszer kell kiszámítani a működése során. További előnyt jelent, hogy a vizsgált térfogat pontsűrűségének beállításával a módszer pontosságát a feladathoz lehet igazítani, illetve a δ **engedékenységi tényező** értékének változtatásával, az átlagolás eredményeként a pontsűrűségnél nagyobb pontosságú eredményt is kaphatunk.

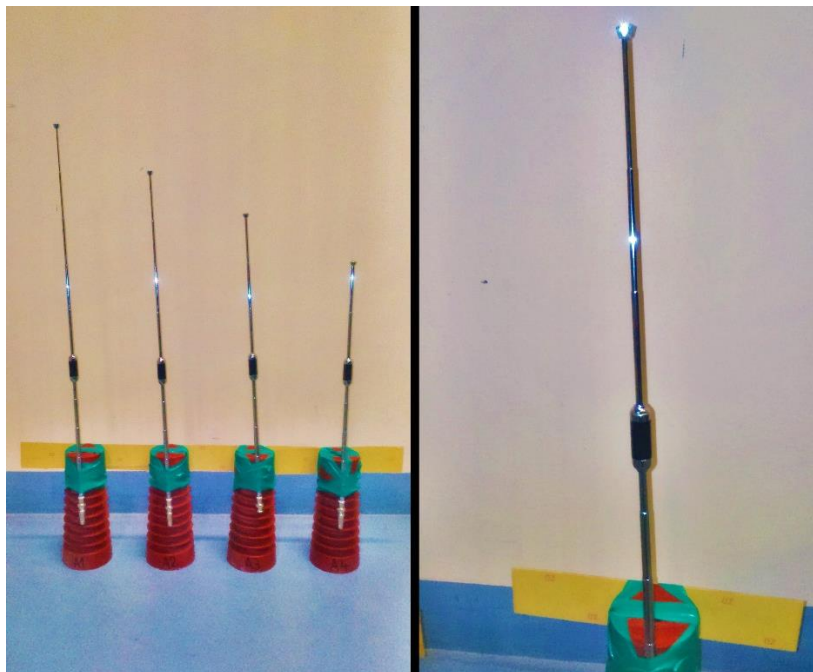
4 A MÉRŐRENDSZER MEGVALÓSÍTÁSA ÉS TESZTELÉSE

4.1 FELÉPÍTÉS ÉS MŰKÖDÉS

Ebben a szakaszban a méréseimhez használt eszközöket ismertetem, illetve bemutatom a megvalósított jelfeldolgozás és helymeghatározás teljes folyamatát.

A részkisülés által kibocsátott elektromágneses zavar frekvenciatartalma erősen függ a konkrét részkisülés típusától, illetve magától az elektródelrendezéstől is. Ennek következtében a mérendő jel frekvenciatartalmának ismerete hiányában olyan antennatípust kerestem, mely az egészen alacsony (100 MHz alatti) frekvenciáktól indulva nagy sáv szélességgel a GHz-es tartományban elhelyezkedő jeleket is képes venni. Ilyen specifikációval rendelkező antennatípus azonban nem található a piacon, ugyanis a nagy sáv szélességű modellek 500 MHz-től felfelé indulnak.

Így esett végül a választásom **négy darab teleszkópos, negyedhullámhosszú szkennert antennára**, melyek az antennahossz állításával névlegesen a **25 MHz és 1300 MHz közötti** frekvenciatartományban működtethetők. A nagy sáv szélesség hiánya ebben az esetben nem okozott problémát, hisz az antennahossz állításával végig tudtam pásztázni (szkennelni) a névleges frekvenciatartományt, megtalálva azt a frekvenciasávot, ahol a hasznos jel a legerősebben vehető.



8. ábra: Az alkalmazott négy teleszkópos szkennert antenna

Méréseim során egy **sajátkezűleg átalakított tű-sík elektródpárral** hoztam létre **koronakisülést**, melyhez a szükséges nagyfeszültséget a **BME Nagyfeszültségű Laboratóriumának 250 kV-os próbatranszformátorával** állítottam elő. A mérésekhez az elektródtávolságot **9 cm-re** állítottam be, a sík-elektrodát földeltem, majd a tű-elektrodra **35 kV** effektív értékű váltakozó feszültséget kapcsoltam.



9. ábra: Koronakisülés létrehozásához használt tű-sík elektrópár (bal); A Nagyfeszültségű Laboratórium 250 kV-os próbatranszformátora (jobb)

A négy antenna jelét egy **négycsatornás, 1 GHz sávszélességű, 10 GSa/s maximális mintavételi frekvenciájú digitális oszcilloszkóppal** rögzítettem. A méréseim során mind a négy csatorna aktív volt, ami a mintavételi frekvenciát az oszcilloszkóp konstrukciójából adódóan **5 GSa/s-ra korlátozta**. Ez azt jelenti, hogy a

meghatározott időkülönbségek pontosságának felső határa a **0,2 ns értékű mintavételi idővel** egyenlő.

A mérésekhez **kezdetben négy darab, egyenként 10 méter hosszú, RG-58 típusú 50 ohmos koaxiális kábelt** használtam az antennák és az oszcilloszkóp közti jelátvitelre. Ez egy általánosan elterjedt típus, továbbá a Laboratóriumban a kezdetektől rendelkezésemre állt a kívánt mennyiség, így ezekkel kezdtem el a mérésorozatot. Méréseim első fázisában több antenna- és részkisülésforrás típust is kipróbáltam, de egyik elrendezéssel sem sikerült feldolgozható minőségű adatokat nyerni. A mért jelek minden esetben nagyon zajosak voltak és a különböző csatornákon ugyanakkor beérkező jelek alakja is ellentmondásosan különbözött, ami ellehetetlenítette az érkezési időkülönbségek helyes megállapítását. További gyanúra adott okot, hogy a kábelek mozgatásával a beérkező jelek alakja és az érkezés időpontja is egyaránt változott. A problémát a kábelek azonos típuson belüli cseréje sem oldotta meg, így az egyedi kábelhiba lehetősége kizárhatóvá vált.

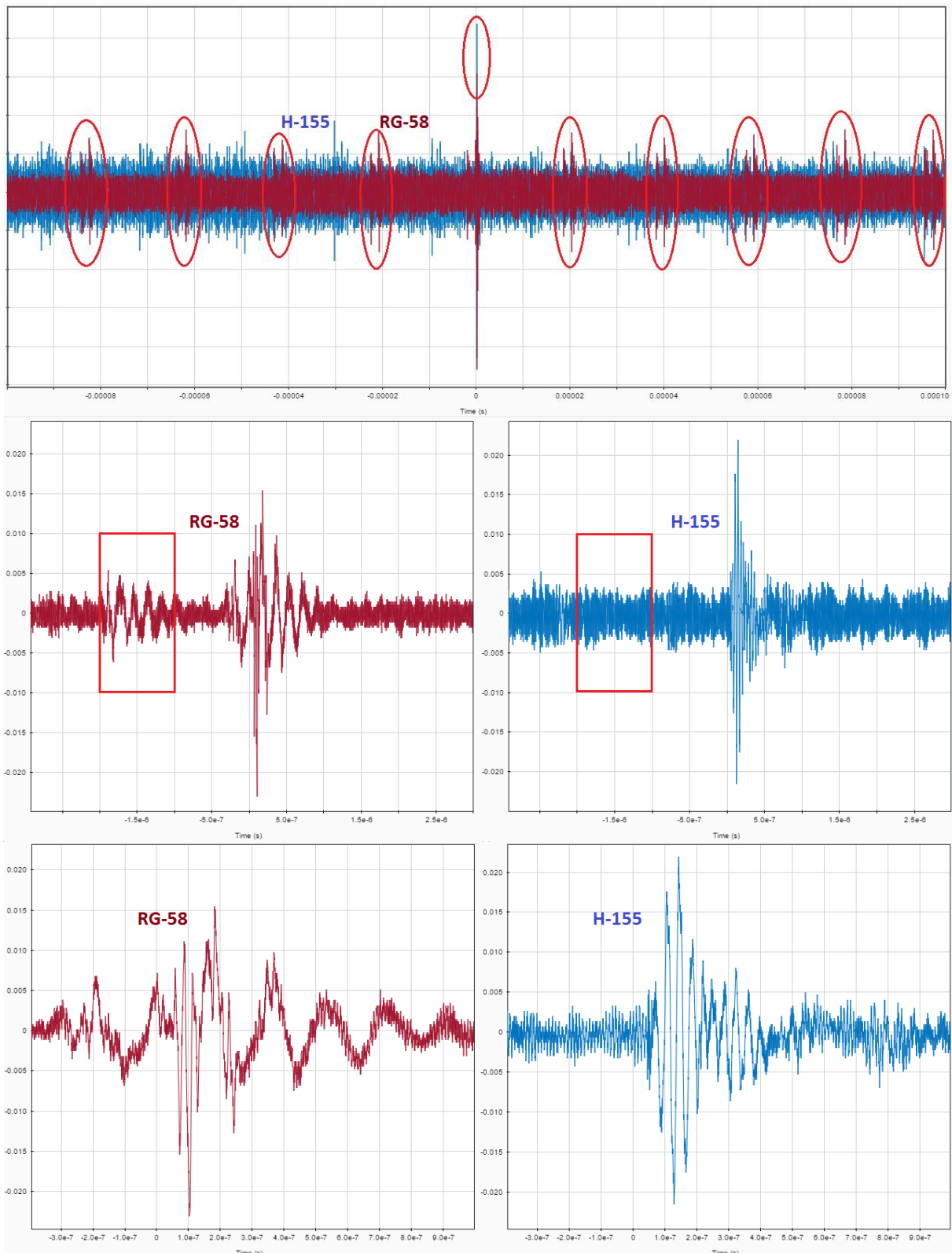
A tapasztalt nehézségeknek több oka is volt, melyeket lépésről lépésre felfedezve sikerült kiküszöbölnöm. Az első probléma a próbatranszformátor nagyfeszültségű kivezetése és a környező földelt tereptárgyak között fellépő részkisülés volt, amit az antennák a vizsgált forrásnál sokkal intenzívebben vettek, elnyomva ezáltal a hasznos jelet. A problémát megoldotta az említett tereptárgyak kellő távolságba helyezése.

További zajokat okoztak a Laboratóriumban működő egyéb berendezések és a kapcsolási jelenségek is (például a világítás kapcsolása), melyek sugárzott és vezetett úton egyaránt megjelentek az oszcilloszkóp képernyőjén.

A legfőbb problémát azonban az **RG-58-as kábel csillapítása, és nem megfelelő árnyékolása** okozta. Utóbbi azt eredményezte, hogy a kábel maga is antennaként funkcionálva több ponton is vette ugyanazt a jelet, mely így ellehetetlenítette a helyes triggerelést, továbbá a jel önmagával vett interferenciái csatornánként különböző torzulásokat eredményeztek. Ez okozta az eltérő jelalakokat, és a képtelenségnek tűnő érkezési időkülönbségeket is.

Ennek megoldására beszereztünk **négy darab, szintén 50 ohmos, egyenként 10 méter hosszú H-155 típusú koaxiális kábelt**, mely típust a nagyfrekvenciás jelátvitelben szokás alkalmazni **jó árnyékolási képessége és alacsony csillapítása** miatt.

Az **RG-58** és a **H-155** típusú koaxiális kábelek közötti minőségi különbségeket jól mutatják a **10. ábra** szerinti méretarányosan ábrázolt jelek.



10. ábra: RG-58 (bal, bordó) és H-155 (jobb, kék) típusú 50 ohmos koaxiális kábelek jeleinek méretarányos összehasonlítása

Az ábra felső részén jól látható, hogy az RG-58-as típusú kábel adott idő alatt többször is vette ugyanazt a jelet, míg a H-155-ös ugyanennyi idő alatt összesen egyszer, ami egyaránt következhet az RG-58-as típus antennaként való viselkedéséből, illetve a kábelvégeken kialakuló reflexiókból is. Első ránézésre meglepő lehet, hogy a jobbnak mondott H-155-ös kábel jele sokkal nagyobb zajszinttel rendelkezik, viszont megfigyelendő, hogy a hasznos jel csúcsa is magasabb értéket vesz fel, mint az RG-58-as esetében. Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy a 10 méternyi H-155-ös kábel sokkal kevésbé csillapítja a jelet, mint az azonos hosszúságú RG-58-as, így érthető, hogy az előbbin keresztül nemcsak a hasznos jel, hanem az antenna által vett zaj is nagyobb amplitúdóval érkezik az oszcilloszkóphoz.

Az ábra középső részén pirossal bekeretezve látható, hogy az RG-58-as kábelnél közvetlenül a jel előtt állandó jelleggel megjelenik egy szintén nagy amplitúdójú zavar, aminek a H-155-ös jele esetén semmi nyoma, így látható, hogy az előbbi kábelt alkalmazva a hasznos jel kezdeti idejeként egy teljesen helytelen értéket állapítottunk volna meg, ellehetetlenítve ezzel a helymeghatározási algoritmus helyes működését.

Az ábra alsó részén esztétikai szempontból is elemezhető a két kábeltípus által eredményezett jelalak. Míg a H-155-ös jele alak és szabályosság szempontjából is hasonlít például a **3. ábra** szerinti jelre, addig az RG-58-as jele ennek egy teljesen torz és szabálytalan változata.

A mérőrendszer fontos része továbbá a BNC csatlakozók felszerelésének következtében nem teljesen egyforma hosszúságú kábelek között fellépő késleltetési különbségek korrekciója. Az ehhez szükséges időkülönbségeket egy függvénygenerátor négyszögjelének mérésén keresztül állapítottam meg az egyes kábelek jeleihez tartozó érkezési idők mérésével. Az ebből kapott korrekciós időértékeket a helymeghatározó algoritmus hozzáadja a kapott TDOA értékekhez, kizárva ezzel a késleltetési különbségből származó helymeghatározási hibákat.

A mérést követően az oszcilloszkóppal rögzített jeleket egy pendrive-on átmásolom a számítógépre, ahol a MATLAB környezetben általam implementált digitális szűrést és TDOA becslést követően a szintén általam írt mintafelismerő algoritmus meghatározza a részkisülés pozícióját, a megadott antenna-koordináták és a becsült, majd korrigált TDOA értékek felhasználásával.

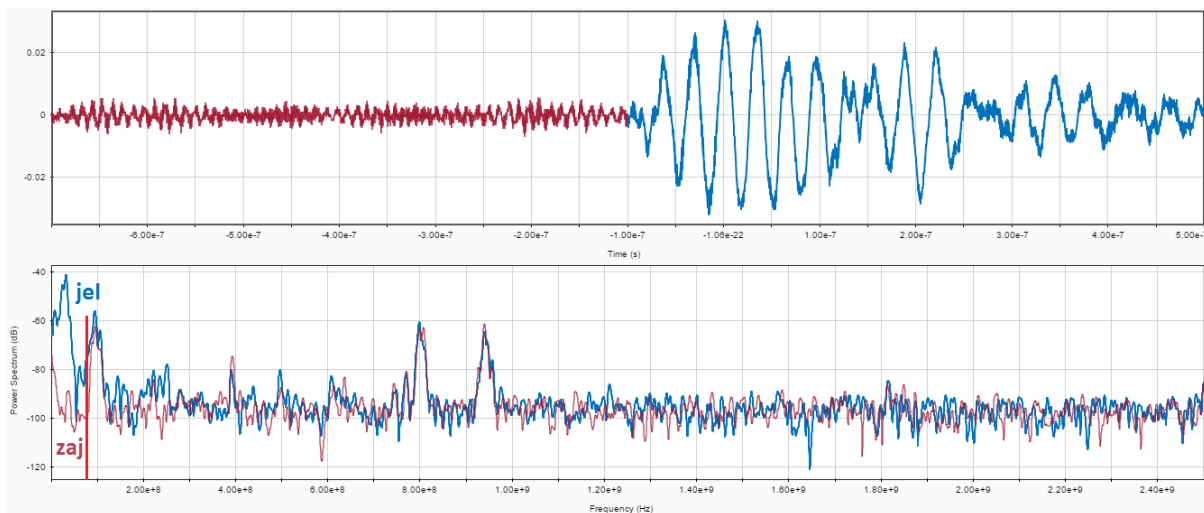
4.2 SAJÁT FEJLESZTÉSEK

Ebben a fejezet részben kitérek a mérőrendszer jelfeldolgozó szakaszának azon részeire, melyeket nem a szakirodalom alapján, hanem teljes mértékben a saját ötleteim szerint valósítottam meg, esetenként kiváltva az irodalmakban ismertetett, de rosszabb eredményt adó módszereket.

4.2.1 Zajszűrés

Az első megoldandó feladat a zajjal terhelt jel megfelelő szűrése volt, ugyanis a 3.2-es fejezet részben ismertetett módszerek, illetve ezek kombinációi sem vezettek használható TDOA értékekhez zajos jelek esetén.

A megfelelő zajszűréshez azonban szükség van a számunkra hasznos jel frekvenciatartalmának meghatározására, hogy ennek ismeretében a szűrés során ne torzuljon a jel által hordozott információ. Ez megoldható, ha a jelet közvetlenül megelőző zajnak, illetve magának a jelnek a spektrumát összehasonlíttjuk. Ezeket a spektrumokat mutatja a **11. ábra**, az összehasonlíthatóság érdekében egymásra rajzolva.

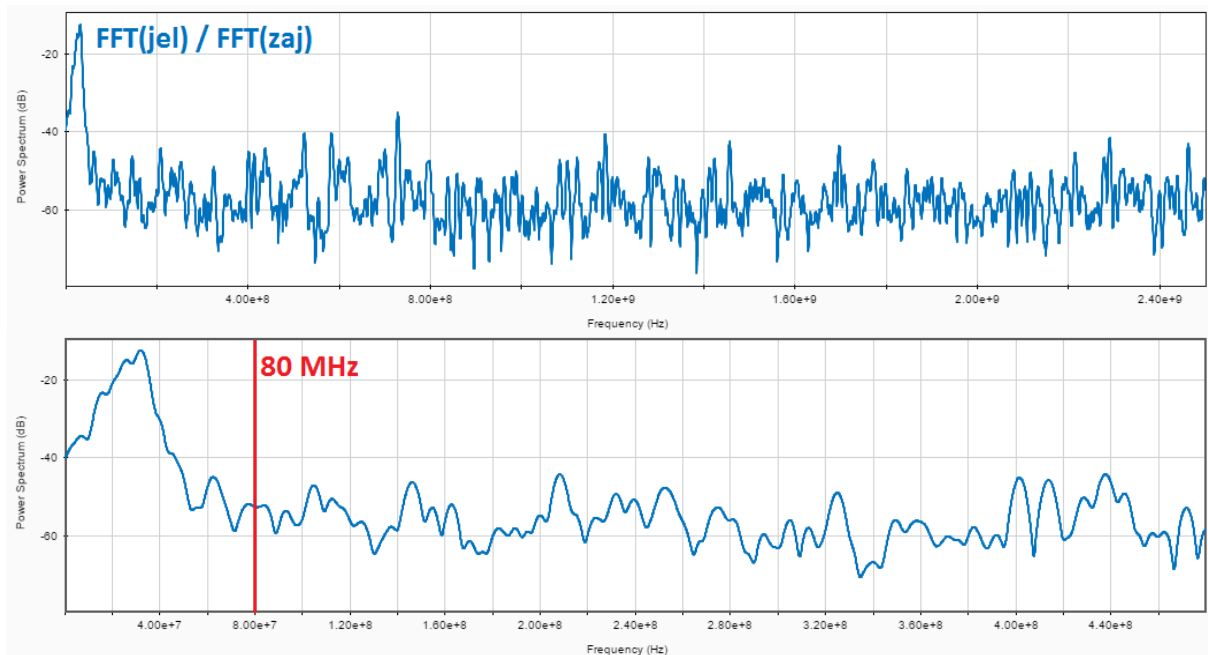


11. ábra: A zajos jel- (kék) és a zaj (bordó) spektrumának [dB] viszonya

Az ábrán látható, hogy a frekvenciatartomány jelentős részében a két spektrum megegyezik, ami azzal magyarázható, hogy ugyanaz a zaj van jelen a vizsgált jelszakaszban is, mint közvetlenül előtte. Ebből az következik, hogy a hasznos jel azokon a frekvenciákon van jelen, ahol spektruma sokkal nagyobb értékű a zajénál. Itt hangsúlyozom, hogy az ábra dB skálázású, így a már itt is látványos

nagyságkülönbségek a valóságban sokkal nagyobbak. Ennek megfelelően megállapítható, hogy a vizsgált jel frekvenciatartalma a piros vonaltól balra található, illetve látható, hogy a vonaltól jobbra egy nem elhanyagolható nagyságú zajkomponens helyezkedik el, így a zajszűrési probléma megoldása a vonalnál magasabb frekvenciák kiszűrése lesz.

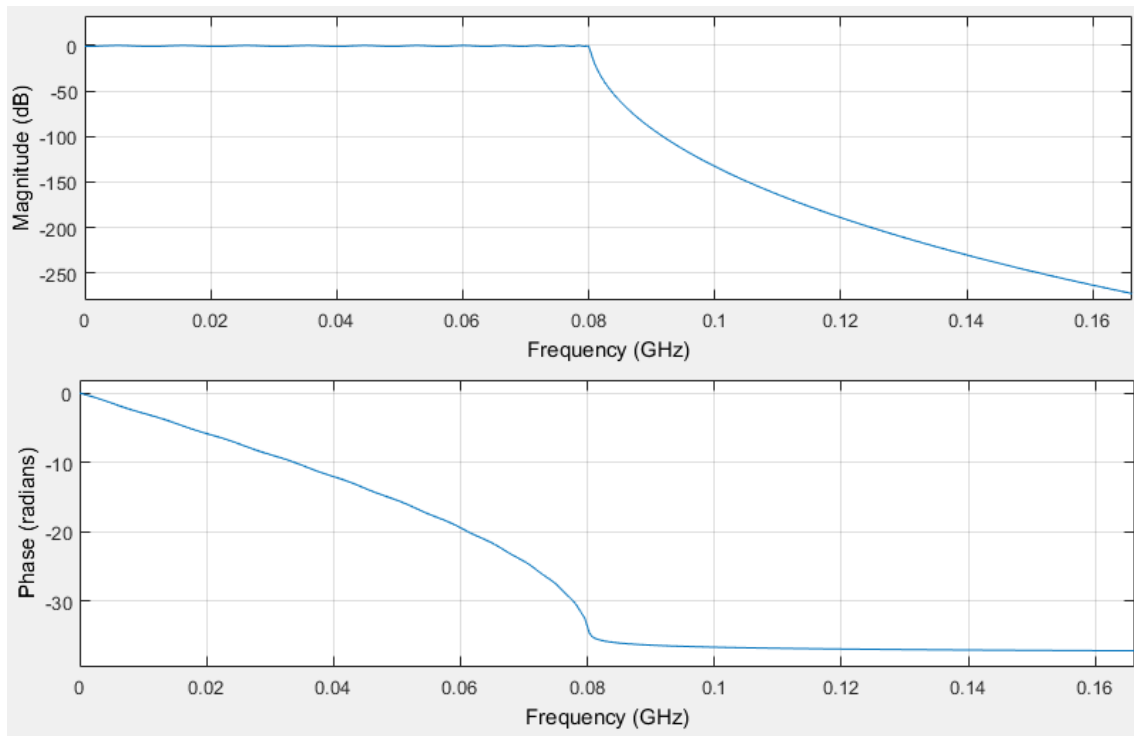
A hasznos jel spektrumát mutatja be pontosabban a **12. ábra**, melyen a jel frekvenciatartalmának látványosabb meghatározása érdekében a jel és a zaj spektrumának a hányadosa (dB skálán a különbsége) látható.



12. ábra: A hasznos jel spektruma [dB] a zajos jel és a zaj spektrumának hányadosaként

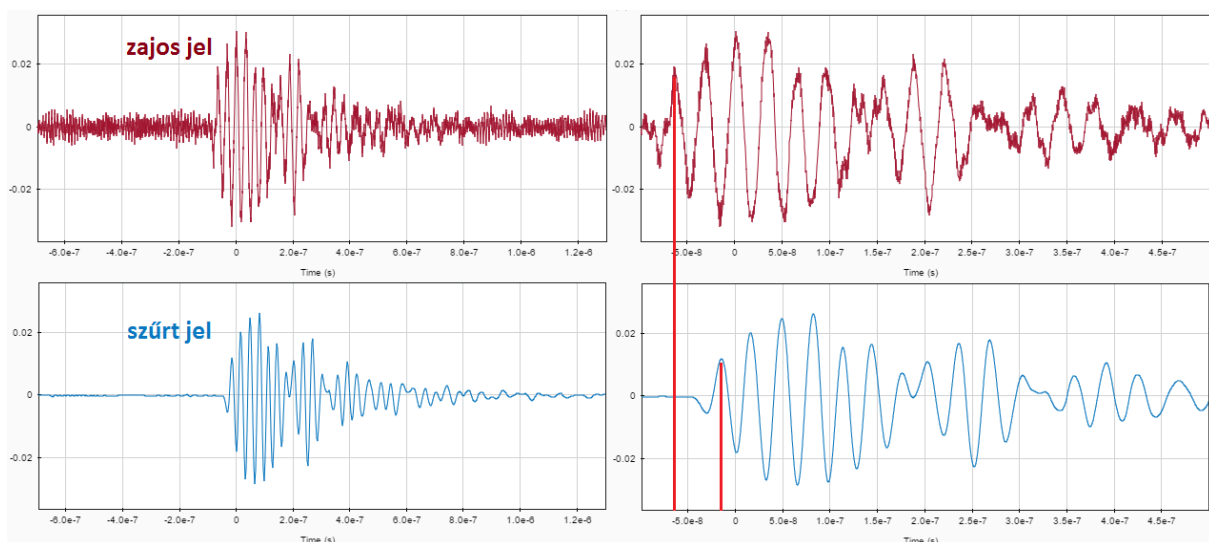
Az ábra alapján látható, hogy egy **80 MHz vágási frekvenciájú, aluláteresztő digitális szűrővel** sikeresen kiszűrhetők a zavaró zajkomponensek úgy, hogy a jel hasznos része közben érintetlen marad.

Különbéle lehetséges szűrőtípusok vizsgálatának eredményeként végül a választásom az **1-es típusú Chebyshev szűrőre** esett. Az általam megvalósított digitális szűrő **80 MHz-ig átengedi** a jelet, majd **85 MHz-en már -60 dB** az erősítése. Ez a meredek átmenet nem elhanyagolható késleltetést (fázistolást) visz a szűrt jelbe, viszont ez nem jelent problémát az időkülönbségek meghatározásakor, hisz a szűrési folyamat minden jelet azonos mértékben késleltet, így a relatív időértékek változatlanok maradnak. Ennek a szűrőnek az átviteli karakterisztikáját (erősítés és fázistolás) mutatja be a **13. ábra**.



13. ábra: A készített digitális aluláteresztő szűrő erősítés [dB] (felül) és fázistolás [rad] (alul) karakterisztikája

A fenti szűrőnek a zajos jelre gyakorolt hatását a **14. ábra** szemlélteti, melyen jól megfigyelhető, hogy a jel alakja nem torzul a szűrés következtében, csupán kismul, mintha egy alapos átlagoláson esett volna át. Pirossal jelölve látszik továbbá a szűrés által okozott, ám számunkra problémát nem jelentő késleltetés is.



14. ábra: Zajos- (felső) és szűrt jel (alsó) méretarányos összehasonlítása

4.2.2 Időkülönbségek meghatározása

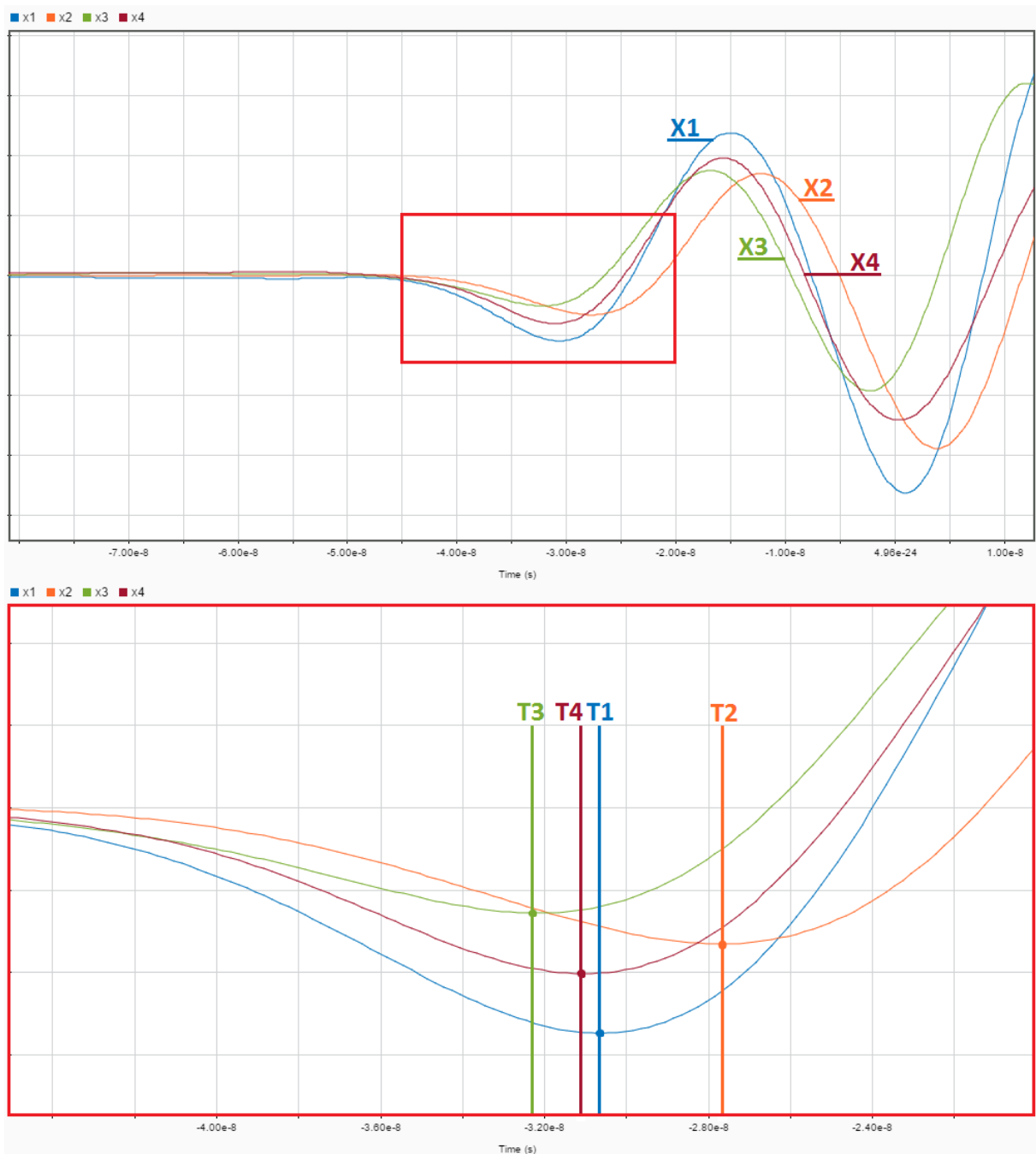
A fenti zajszűrés motivációja az volt, hogy a **3.2**-es fejezet részben ismertetett módszerek egyike sem eredményezett megfelelő TDOA értékeket szűretlen jel esetén. Ez a probléma azonban érdekes módon a jelek szűrését követően sem oldódott meg, ugyanis a kapott időértékek továbbra sem közelítették meg az elvi úton kiszámolt, várt értékeket. Akárhogy állítottam a paramétereket, vagy kombináltam az ismertetett módszereket, minden egyes alkalommal helytelen időértékeket kaptam.

A szűrt jelek kirajzolásával és szemrevételezésével azonban megfigyeltem, hogy a hasznos jelek első néhány csúcsa között mérhető időkülönbségek összhangban voltak a teljes elrendezés ismeretében számolt értékekkel. A legpontosabb TDOA értékek a jelek első (jelen esetben negatív értékű) csúcsai között voltak mérhetőek. A **csúcserképek keresése** jól algoritmizálható feladatnak bizonyult, így végül megszületett egy **saját fejlesztésű algoritmus a TDOA értékek meghatározására**.

Az algoritmus a teljes szűrt jel pillanatnyi jelenergiáját (négyzetét) feldolgozva megállapít egy küszöbértéket, mely fölött a jelszintet már a hasznos jelhez tartozónak tekinti. Ezt követően a küszöbszint fölötti értékeket vizsgálva megkeresi az első lokális maximumot és meghatározza az ide tartozó időértéket. Ezt az időpontot tekintjük a hasznos jel kezdetének (T_1, T_2, T_3, T_4), és a keresett TDOA értékeket (T_{12}, T_{13}, T_{14}) ezen időértékek megfelelő különbségeként kapjuk.

A jel négyzetre emelésére azért volt szükség, hogy amennyiben a jel első csúcsa negatív előjelű (mint a jelenleg vizsgált jelek esetében is), azt is ugyanúgy figyelembe vegye az algoritmus a lokális maximumkeresés során. A célnak természetesen a jel abszolút értéke is megfelelt volna, bár a pillanatnyi jelenergia esetén a megmaradt zaj és a jel amplitúdója jobban elkülöníthető egymástól, ami könnyebbé teszi a küszöbszint meghatározását.

Az algoritmus tesztelése során kapott időértékek a szemrevételezéses vizsgálattal összhangban voltak, ezáltal ígéretesnek bizonyultak a további felhasználásra. Mivel a többi módszer közelítően sem adott jó időértékeket, a további mérési adatok feldolgozása során csak ezt az algoritmust fogom alkalmazni. A leírt **csúcskereső módszerrel** meghatározott jelkezdeti időértékeket szemlélteti a **15. ábra**.



15. ábra: Saját fejlesztésű csúcskereső algoritmus által meghatározott jelkezdeti időértékek szemléltetése

4.3 PONTOSSÁG TESZTELÉSE

Ebben a fejezet részben különböző mérési elrendezések esetén tesztelem az összeállított mérőrendszer pontosságát.

4.3.1 Kísérleti elrendezések

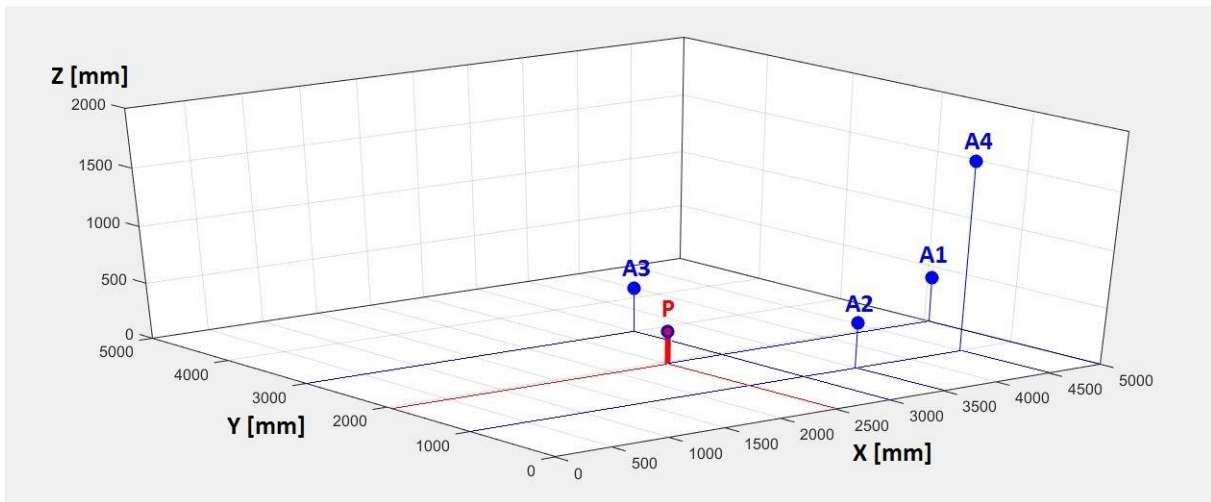
A rendszer tesztelésekor **5 különböző elrendezést** vizsgáltam, melyek során a **részkisülésforrás végig változatlan pozícióban** maradt, így az elrendezéseket az antennák mozgatásával tudtam változtatni. Azért választottam ezt a felállást, mert a rendszer ipari alkalmazása során is egy fix pozíciójú forrást kell majd megtalálni, így az egyetlen változtatható fizikai paraméter az antennák helyzete lesz.

A mérések során a teleszkópos antennákat a kis frekvenciák elérése érdekében maximális hosszúság mellett használtam ($l=\lambda/4=63$ cm, $f_{\text{névleges,sávközép}}=119$ MHz), ugyanis ahogy azt a **12. ábra** is mutatja, a vizsgált koronakisülés a 80 MHz alatti frekvenciatartományban dominál.

Az alábbiakban ismertetem az elrendezések koordináta-értékeit, illetve vizuálisan is szemléltetem az antennák és a részkisülésforrás egymáshoz viszonyított elhelyezkedését a vizsgált térrészben. A teleszkópos **antennákat reprezentáló térbeli pontoknak** az **antennák geometriai középpontjait** választottam, azonban nem elfelejtendő, hogy mivel függőleges irányban több mint fél méter hosszúak, így az általam választott Z koordináták nem biztos, hogy a legjobb eredményt fogják adni.

1. táblázat: Az I. számú elrendezés koordináta-értékei

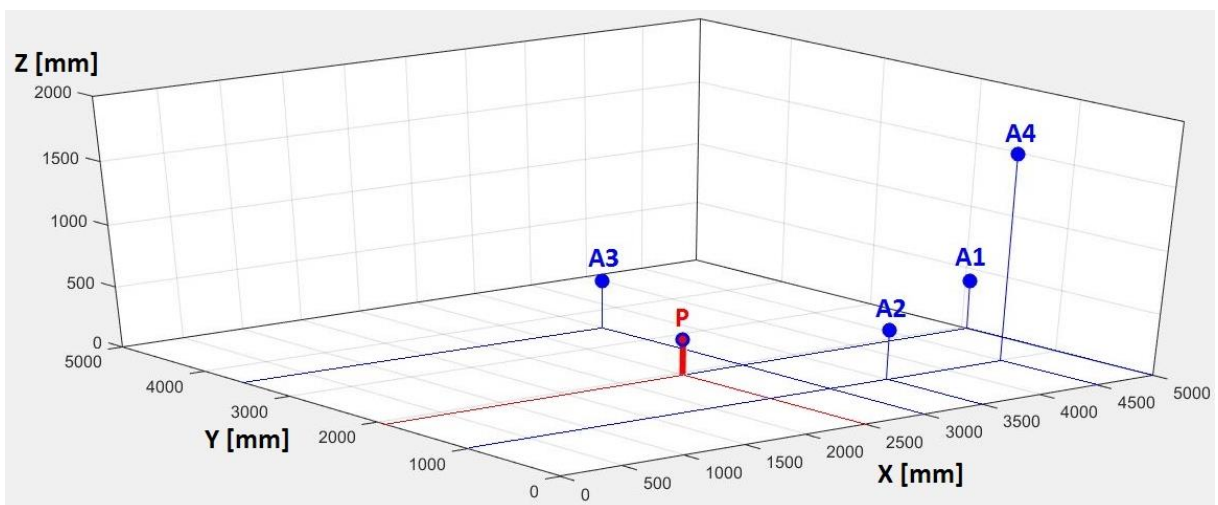
I. elrendezés	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A1	5000	1950	400
A2	3500	1000	400
A3	3000	3000	400
A4	4500	1000	1650
P	2500	1950	285



16. ábra: Az I. számú elrendezés ábrázolása a vizsgált térrészben

2. táblázat: A II. számú elrendezés koordináta-értékei

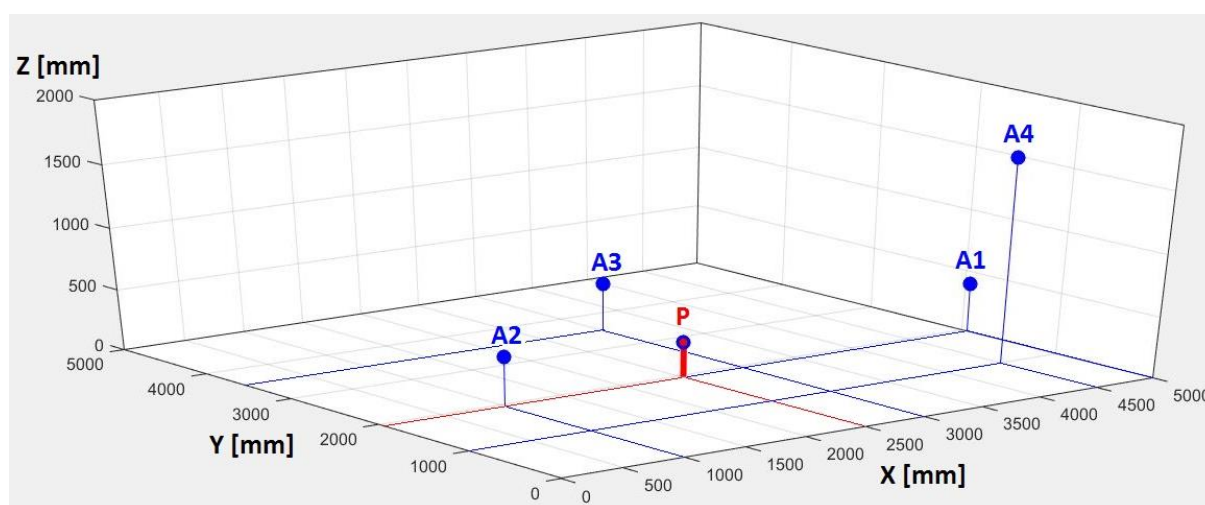
II. elrendezés	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A1	5000	1950	400
A2	3500	1000	400
A3	3000	3500	400
A4	4500	1000	1650
P	2500	1950	285



17. ábra: A II. számú elrendezés ábrázolása a vizsgált térrészben

3. táblázat: A III. számú elrendezés koordináta-értékei

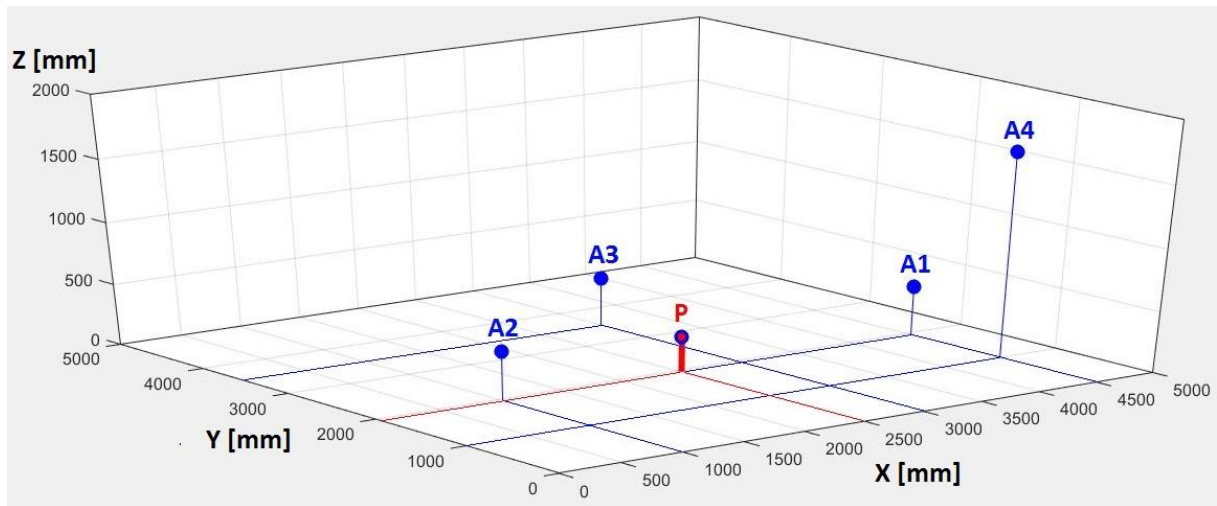
III. elrendezés	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A1	5000	1950	400
A2	1000	1950	400
A3	3000	3500	400
A4	4500	1000	1650
P	2500	1950	285



18. ábra: A III. számú elrendezés ábrázolása a vizsgált térrészben

4. táblázat: A IV. számú elrendezés koordináta-értékei

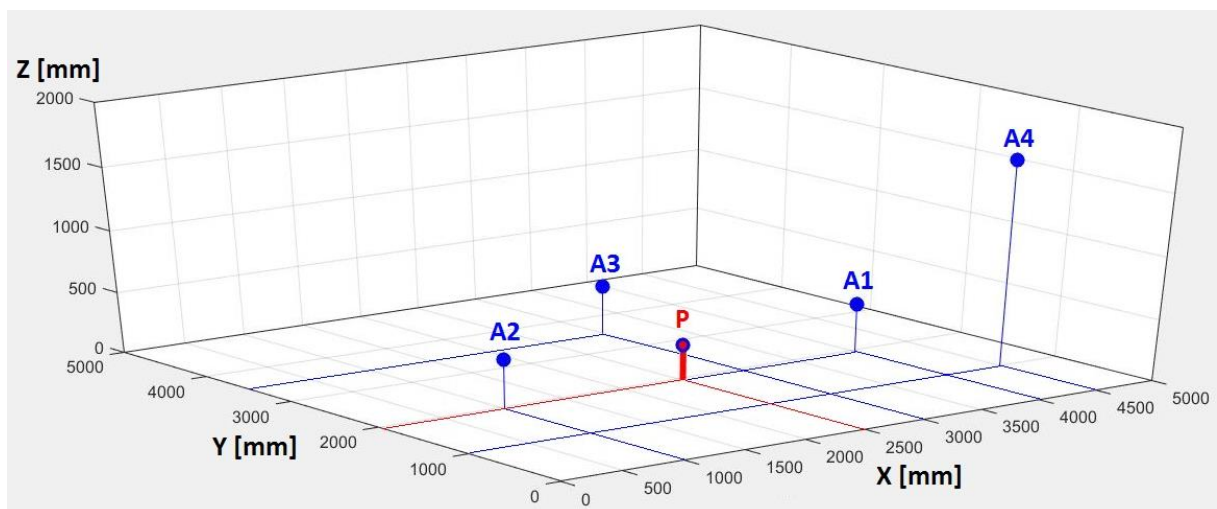
IV. elrendezés	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A1	4500	1950	400
A2	1000	1950	400
A3	3000	3500	400
A4	4500	1000	1650
P	2500	1950	285



19. ábra: A IV. számú elrendezés ábrázolása a vizsgált térrészben

5. táblázat: Az V. számú elrendezés koordináta-értékei

V. elrendezés	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A1	4000	1950	400
A2	1000	1950	400
A3	3000	3500	400
A4	4500	1000	1650
P	2500	1950	285



20. ábra: Az V. számú elrendezés ábrázolása a vizsgált térrészben

4.3.2 Mérési eredmények

Minden elrendezésre 200 mérést hajtottam végre, majd a rögzített jeleket a MATLAB környezetben implementált jelfeldolgozó rendszerrel dolgoztam fel és értékeltem ki. A rendszer első lépésként a beadott jeleket zajszűrésnek veti alá a készített **digitális aluláteresztő szűrő** felhasználásával. Az egy méréshez tartozó szűrt jeleket ezek után a készített **csúcskereső algoritmus** feldolgozza, majd mérésenként meghatározza a megfelelő TDOA értékeket.

Következő lépésként a **mintafelismerő algoritmus** bemenetként megkapja az **antennák koordinátáit**, a vizsgált térrész (**téglatest**) helyzetét és méreteit, a felvett **pontok sűrűségét**, a d_{ref} meghatározásához szükséges **δ engedékenységi tényezőt**, illetve a csúcskereső algoritmus által meghatározott **TDOA értékeket**, melyeket a további feldolgozás előtt először **korrigál** a kábelek késleltetékülönbsége ellen. A teszteléskor használt paramétereket a **6. táblázat** ismerteti.

Utolsó lépésként a helymeghatározó algoritmus először mérésenként becslést ad a forrás pozíciójára, melyek várható értéke képezi az **1. típusú lokalizációs eredményt**. A **2. típusú eredményt** az algoritmus a mérésenként kapott megfelelő TDOA értékek várható értékéből számítja ki, **nagyobb vizsgált pontsűrűség** mellett.

6. táblázat: A jelfeldolgozó rendszer teszteléséhez használt paraméterek

Paraméterek		X	Y	Z
Vizsgált térrész		[0; 5000] mm	[0; 5000] mm	[0; 2000] mm
Pontsűrűség	1. típusú eredmény	25 pont/m	25 pont/m	25 pont/m
	2. típusú eredmény	50 pont/m	50 pont/m	50 pont/m
Engedékenységi tényező (δ)		1,2		

Az alábbi táblázatok tartalmazzák a **4.3.1-es** alfejezetben bemutatott mérési elrendezések esetén kapott becsléseket a részkisülés pozíciójára (**1. és 2. típusú eredmények**), összehasonlítva őket a forrás valós térbeli helyzetével.

7. táblázat: Az I. számú elrendezés helymeghatározási eredményei

I. elrendezés			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
P_{valós}			2500	1950	285
P_{becsült}	1. típus: 200 darab P_{becsült} átlaga	Pozíció	2439	1982	420
		Szórás	81	32	66
		Hiba	-61	32	135
	2. típus: 200 mérésnyi TDOA átlagából	Pozíció	2440	1978	424
		Hiba	-60	28	139

8. táblázat: A II. számú elrendezés helymeghatározási eredményei

II. elrendezés			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
P_{valós}			2500	1950	285
P_{becsült}	1. típus: 200 darab P_{becsült} átlaga	Pozíció	2454	1970	416
		Szórás	58	28	52
		Hiba	-46	20	131
	2. típus: 200 mérésnyi TDOA átlagából	Pozíció	2380	1918	343
		Hiba	-120	-32	58

9. táblázat: A III. számú elrendezés helymeghatározási eredményei

III. elrendezés			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
P_{valós}			2500	1950	285
P_{becsült}	1. típus: 200 darab P_{becsült} átlaga	Pozíció	2483	1995	453
		Szórás	24	18	63
		Hiba	-17	45	168
	2. típus: 200 mérésnyi TDOA átlagából	Pozíció	2490	2001	451
		Hiba	-10	51	166

10. táblázat: A IV. számú elrendezés helymeghatározási eredményei

IV. elrendezés			X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
P_{valós}			2500	1950	285
P_{becsült}	1. típus: 200 darab P_{becsült} átlaga	Pozíció	2498	1995	419
		Szórás	148	27	52
		Hiba	-2	45	134
	2. típus: 200 mérésnyi TDOA átlagából	Pozíció	2450	1948	364
		Hiba	-50	-2	79

11. táblázat: Az **V. számú** elrendezés helymeghatározási eredményei

V. elrendezés		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	
$P_{\text{valós}}$		2500	1950	285	
$P_{\text{becsült}}$	1. típus: 200 darab $P_{\text{becsült}}$ átlaga	Pozíció	2501	1990	393
		Szórás	12	21	48
		Hiba	1	40	108
	2. típus: 200 mérésnyi TDOA átlagából	Pozíció	2510	1988	394
Hiba		10	38	109	

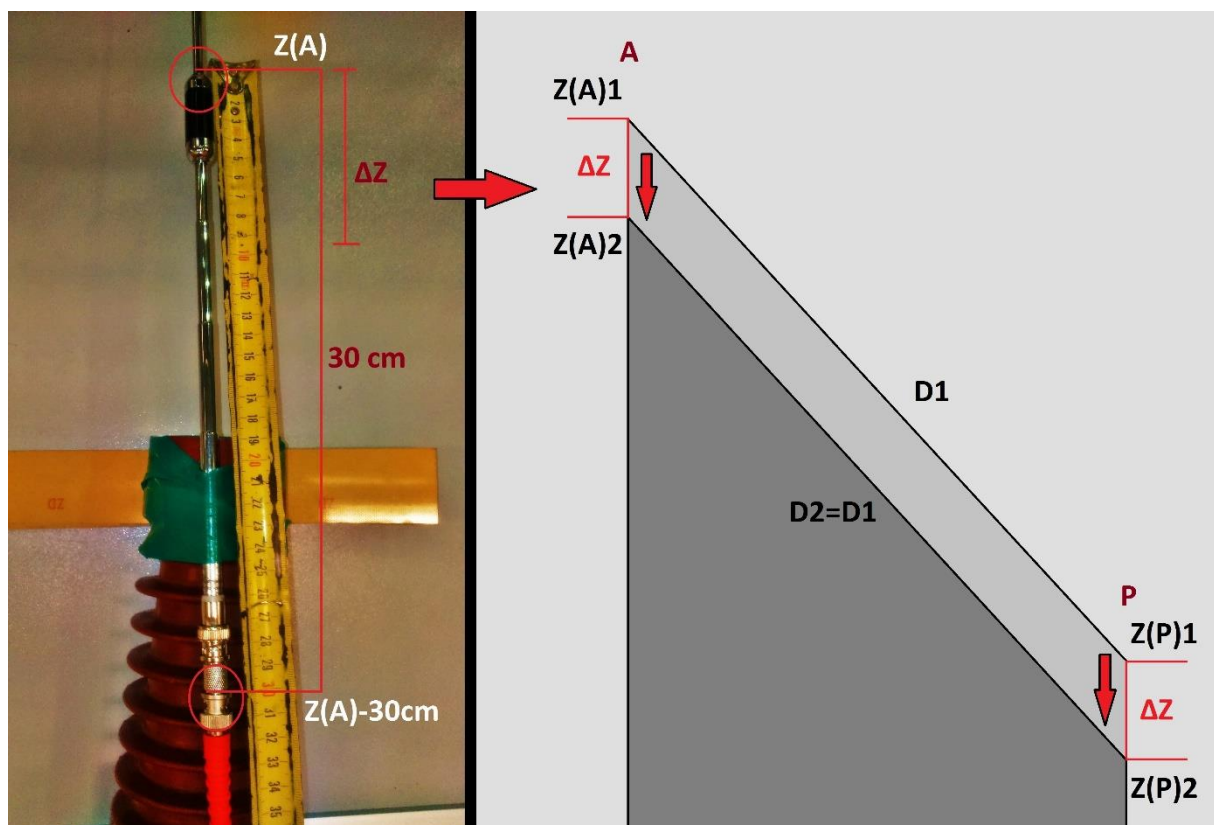
A **7. táblázat-11. táblázat**ok egyenként történő elemzésével megállapítható, hogy az elrendezések eredményei között nincs kiemelkedő mértékű eltérés, továbbá az egy elrendezésen belüli 1. és 2. típusú eredmények is konzisztensen hasonló értékűek lettek. Ezt figyelembe véve, az átlátható, együttes kiértékeléshez a **12. táblázat**ban megtalálható az **öt elrendezés eredményeinek átlaga**, továbbá a **hibák százalékos értéke a valós koordinátákhoz viszonyítva**.

12. táblázat: Az **öt** elrendezés helymeghatározási eredményeinek összesítése a valós koordinátákhoz viszonyítva

Öt elrendezés átlaga		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
$P_{\text{valós}}$		2500	1950	285
Átlagos $P_{\text{becsült}}$	Pozíció	2464	1976	408
	Hiba	-36	26	123
Százalékos hiba a valós koordinátákhoz viszonyítva		-1,4 %	1,4 %	<u>43,1 %</u>

A **12. táblázat** hibaértékeiből jól látható, hogy a mérőrendszer a valós **X** és **Y** koordinátákat elhanyagolható mértékű százalékos hibával közelíti, míg a **Z** tengely irányában közel 50%, állandó jelleggel mérhető hiba tapasztalható. Ennek legvalószínűbb oka az antennák korábban már említett, nagy mértékű függőleges kiterjedése, melynek következtében a **Z** koordinátáikat csak közelítéssel lehet megadni.

Ahogy azt a **21. ábra** jobb oldala is mutatja, ha az összes antenna függőleges koordinátáját azonos mértékben megváltoztatjuk a mintafelismerő algoritmus bemeneténél, akkor a kapott becslés függőleges koordinátája ideális esetben pontosan ugyanekkora értékkel fog változni az eredeti beállításokhoz képest. Ennek oka, hogy a helymeghatározó algoritmus a részkisülés pozícióját az antennák koordinátaíhoz viszonyítva számítja ki, tehát, ha az antennákat egységesen eltoljuk ΔZ -vel, akkor a részkisülés becsült pozíciója is eltolódik ΔZ -vel, mert az antennához viszonyított pozíciója változatlan kell, hogy maradjon.



21. ábra: Antenna Z koordinátájának hatása a forrás becsült függőleges helyzetére
Z(A): az eddigi számítások során használt függőleges antenna-koordináta

A jelenség, miszerint a becsült pozíció Z koordinátája átlagosan 123 milliméterrel van a valós koordináta fölött, megszüntethető, ha az összes antenna függőleges koordinátáját csökkentjük ezzel az értékkel. Ez azt jelenti, hogy az elvégzett 1000 darab (5x200) mérés átlaga alapján pontosabb eredményt kapnánk, ha az antennák Z koordinátájának a **21. ábra** bal oldalán látható 30 cm-es szakasz középső részét választanánk a Z(A)-val jelölt geometriai középpont helyett.

A leírtak alátámasztására az **I. elrendezés** mérései esetén úgy is lefuttattam a helymeghatározó algoritmust, hogy **az antennák Z koordinátáit 123 milliméterrel alacsonyabb értékre állítottam be**. Az így kapott eredményeket hasonlítva össze a korábbi értékekkel a **13. táblázat**, melynek tartalma teljes mértékben alátámasztja az eddig leírtakat.

13. táblázat: Az **I. számú** elrendezés helymeghatározási eredményei **123 mm-rel** csökkentett függőleges antenna-koordináták esetén

I. elrendezés: $Z(A)_2 = Z(A)_1 - 123 \text{ mm}$		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
P_{valós}		2500	1950	285
P_{becsült}: 1. és 2. típus átlaga (eredeti)	Pozíció	2439	1980	422
	Hiba	-61	30	137
	Százalékos hiba a valós koordinátákhoz viszonyítva	-2 %	2 %	<u>48 %</u>
P_{becsült}: 1. és 2. típus átlaga (módosított)	Pozíció	2439	1980	300
	Hiba	-61	30	15
	Százalékos hiba a valós koordinátákhoz viszonyítva	-2 %	2 %	<u>5 %</u>
Eltérés az eredeti becsléstől		0	0	<u>-122</u>

A kapott eredmények jól mutatják, hogy az antennák koordinátáinak egységes, Z irányú módosítása közvetlenül (1 mm hibával) megjelenik a becsült pozíció Z koordinátájában is, miközben az X és Y koordináták változatlanok maradnak.

4.4 MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A 4.3.2-es alfejezetben leírtak alapján látható, hogy a mérőrendszer az X és Y koordináták tekintetében nagy pontossággal használható a tesztelt koronaelektrod részkiülésének lokalizálására. Megállapítható továbbá, hogy a használt teleszkópos antennák függőleges kiterjedése jelentős mértékű bizonytalanságot visz a keresett pozíció Z koordinátájának meghatározásába. A probléma kiküszöbölhető, ha egy ismert térbeli helyzetű jelforrásra sok mérést végezve, megállapítjuk azt a korrekciós értéket, mellyel egységesen módosítani kell az antennák Z koordinátáit a helymeghatározás során. A módszer viszont csak akkor alkalmazható megbízhatóan, ha több, függőleges irányban eltérő elrendezésen való tesztelést követően beláttuk, hogy a kapott korrekciós érték általánosan használható és nem elrendezésfüggő. Amennyiben ezt beláttuk, úgy meg tudjuk állapítani egy adott teleszkópos antennáról, hogy melyik szakasza vesz részt a legaktívabban a jel vételében.

A fentiek figyelembe vételével kijelenthető, hogy a mintafelismerő algoritmus egy praktikus és gyors módja a helymeghatározás alapproblémájaként kapott egyenletrendszer megoldásának. Az irodalomkutatás során összegyűjtött TDOA-meghatározó módszerek kudarca további vizsgálatot igényel, hisz a referenciaként megjelölt cikkek írói sikerről számoltak be. A saját fejlesztésű zajszűrést és csúcskereső algoritmust további teszteknek kell alávetni, hogy kiderüljön, mennyire alkalmazhatóak általánosan a részkiülések különböző fajtái esetén. Amennyiben az eredmény kedvező, kialakítható lesz belőlük egy ígéretes, új típusú jelfeldolgozó rendszer.

5 IPARI FELHASZNÁLHATÓSÁG, JÖVŐBELI TERVEK

Dolgozatom zárásaként egy kitekintőt kívánok tenni, melynek során ismertetem a mérőrendszerrel kapcsolatos kutatási-fejlesztési terveimet, illetve a rendszer felhasználási lehetőségeit.

A méréseim során tesztelt, mesterségesen létrehozott koronakisülés csak az első lépés volt a rendszer fejlesztésében. A rendszer továbbfejlesztéséhez először más elektród-elrendezésű koronakisüléseket kell vizsgálni, majd ezek sikerét követően tovább kell lépni egyéb részakisüléstípusok mérésére is. A végső cél, hogy tetszőleges típusú részakisülésre alkalmazható legyen a mérőrendszer. Ennek egyik elengedhetetlen eleme a különböző típusok spektrumának tanulmányozása lehetőleg zajmentes környezetben. A spektrumok vizsgálatának szükségességét az adja, hogy a részakisülés fajtájától függően elképzelhető, hogy eltérő jelfeldolgozási módszerek adnak optimális eredményt, ennek figyelembe vételéhez viszont a rendszernek először fel kell ismernie az adott kisülés típusát annak spektruma alapján. A hasznos jel spektrumának azonosítására és automatizált zajszűrésére jól algoritmizálható módszer a **4.2.1**-es fejezetrészben ismertetett lépéssorozat. A **4.2.2**-es szakaszban ismertetett csúcskereső algoritmus is ígéretesnek bizonyult a méréseim során, így ennek tesztelését is folytatni kívánom különböző fajtájú részakisülésekkel.

Rövidtávú terveim között szerepel a zajszűrő egység algoritmizálása és tesztelése különféle jelforrásokra. Ezt követően, a csúcskereső és a mintafelismerő algoritmussal kombinálva létre kívánok hozni egy teljes, önállóan is működőképes jelfeldolgozó, helymeghatározó rendszert, mely bemenetként a rögzített jelet fogadja, kimenete pedig a becsült részakisülés-pozíció.

Középtávú tervem a jelenlegi, offline működésű rendszer online (valós idejű) működésűvé tétele. Ehhez implementálni kívánok egy olyan programot, amely az oszcilloszkóppal éppen mért adatokat közvetlenül a jelfeldolgozást végző számítógépre továbbítja. Ez a program rendelkezne egy grafikus felhasználói felülettel is, amin keresztül a szükséges paraméterek átadhatók a jelfeldolgozó, helymeghatározó rendszernek, továbbá a felhasználó itt kapna visszajelzést a helymeghatározás eredményéről is. Lehetőség lenne továbbá a vizsgált berendezés háromdimenziós tervrajzának betöltésére is, így a helymeghatározás eredménye vizuálisan is megjelenne a berendezés hibás részén.

Hosszabb távú tervem egy olyan rendszer elkészítése, mely a mért jel alapján nagy bizonyossággal megállapítja a részkisülés típusát, továbbá a típus ismeretében meghatározza, hogy a vizsgált berendezés melyik részében lehet a kisülés. Ehhez szükséges az adott berendezés különböző hibás részeinek vizsgálata, részletesen kiértékelve, hogy mely hibatípusok milyen spektrumú kisüléssel állnak szoros kapcsolatban. Ennek az információnak a birtokában helymeghatározási algoritmus alkalmazása nélkül jelentősen leszűkíthető a keresés a berendezés egy kisebb térrészére, így az antennák elrendezését, illetve a jelfeldolgozó, helymeghatározó rendszer paramétereit ennek megfelelően pontosítani tudjuk. Ezzel tehát a rendszer nagy hatékonysággal alkalmazhatóvá válna a berendezések üzembe helyezés előtti rutinvizsgálatainak során.

Hosszútávú tervem a mérőrendszer felhasználási körének kiterjesztése a már üzemben levő berendezések diagnosztikai vizsgálataira is. Ez annyiban nehezebb feladat az eddigieknél, hogy például egy állomáson sokkal nagyobb az elektromágneses és vezetett zajszint, mint egy berendezésgyártó üzem esetlegesen árnyékolt próbatermében. Ehhez a feladathoz ki kell terjesztenem a zajszűrési rendszert az üzemi jellegű zajokra is, illetve módot kell találni az esetlegesen több forrásból érkező jelek elkülönítésére a feldolgozás előtt.

Miután mindez sikerrel megvalósult, a végső cél egy piacképes célrendszer megtervezése, mely általánosan alkalmazható különböző típusú részkisülések lokalizálására különböző zajszintű környezetekben egyaránt, tökéletes kiegészítéseként a hagyományos részkisülmérő (de lokalizációra képtelen) berendezéseknek. Az univerzális alkalmazhatóság eléréséhez nélkülözhetetlen a részkisülésfizika és az elektromágneses hullámok térbeli terjedési tulajdonságainak mérőrendszerbe való integrálása. A célrendszer továbbá megfelelő használati utasítással kell, hogy rendelkezzen, mely kitér az egyes szituációkban alkalmazandó antenna-elrendezésekre, illetve a különféle választható helymeghatározó módszerek és elrendezések működési bizonytalanságait is tartalmazza. Ezen információhalmazt természetesen csak számos mérésorozat elvégzésén és azok szakértői kiértékelésén keresztül lehet megszerezni.

Mindent egybe vetve, a téma változatossága, újszerűsége és a benne rejlő sok lehetőség jelentős mértékben felkeltette az érdeklődésemet, így a kutatást hosszabb távon is folytatni fogom.

6 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Dolgozatom végére érve ezúton is ki szeretném fejezni köszönetemet a **BME Nagyfeszültségű Laboratóriuma** vezetőségének, amiért a kutatás teljes időtartama alatt rendelkezésemre bocsátották a szükséges nagyfeszültségű berendezéseket, továbbá segítségemre voltak a mérőrendszerhez elengedhetetlen egyéb eszközök beszerzésében is.

7 ÁBRA-, EGYENLET- ÉS TÁBLÁZATJEGYZÉK

7.1 ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A villamosenergia-rendszer három fő egysége: termelés, szállítás, elosztás [1]	5
2. ábra: Koronakisülések egy Wartenberg kerék tűinek csúcsainál [3]	7
3. ábra: Antennával mért részkisülés jelalakja és spektruma	7
4. ábra: A helymeghatározás alapproblémájának modellje	8
5. ábra: TDOA szemléltetése 2 antenna szűretlen jelével	9
6. ábra: Szűretlen PD jelek, Pillanatnyi jelenergia, Energia-ablakozó függvény, Kumulatív energia görbe	13
7. ábra: Keresztkorrelációs függvény, Koherencia függvény IFFT-je.....	15
8. ábra: Az alkalmazott négy teleszkópos szkennert antenna	19
9. ábra: Koronakisülés létrehozásához használt tű-sík elektród-pár;A Nagyfeszültségű Laboratórium 250 kV-os próbatranszformátora	20
10. ábra: RG-58 és H-155 típusú 50 ohmos koaxiális kábelek jeleinek méretarányos összehasonlítása	22
11. ábra: A zajos jel- és a zaj spektrumának [dB] viszonya	24
12. ábra: A hasznos jel spektruma [dB] a zajos jel és a zaj spektrumának hányadosaként ..	25
13. ábra: A készített digitális aluláteresztő szűrő erősítés [dB] és fázistolás [rad] karakterisztikája	26
14. ábra: Zajos- és szűrt jel méretarányos összehasonlítása	26
15. ábra: Saját fejlesztésű csúcskereső algoritmus által meghatározott jelkezdeti időértékek szemléltetése.....	28
16. ábra: Az I. számú elrendezés ábrázolása a vizsgált térrészben	30
17. ábra: A II. számú elrendezés ábrázolása a vizsgált térrészben	30
18. ábra: A III. számú elrendezés ábrázolása a vizsgált térrészben	31
19. ábra: A IV. számú elrendezés ábrázolása a vizsgált térrészben.....	32
20. ábra: Az V. számú elrendezés ábrázolása a vizsgált térrészben.....	32
21. ábra: Antenna Z koordinátájának hatása a forrás becsült függőleges helyzetére	37

7.2 EGYENLETJEGYZÉK

1. egyenlet: Antennák és részkisülés koordinátái	8
2. egyenlet: TDOA értékek a megfelelő TOF-ek különbségeként	9
3. egyenlet: A helymeghatározás problémáját leíró egyenletrendszer	10
4. egyenlet: A négy antenna idealizált jelének kapcsolata	10
5. egyenlet: Pillanatnyi jelenergia (diszkrét).....	12
6. egyenlet: Energia-ablakozó függvény (diszkrét)	12
7. egyenlet: Kumulatív energia görbe (diszkrét).....	12
8. egyenlet: Keresztkorrelációs függvény a 4 antenna jelére (diszkrét)	14
9. egyenlet: Keresztkorreláció meghatározása frekvencia tartományban	15
10. egyenlet: Koherencia függvény definíciója (frekvencia tartomány)	15
11. egyenlet: A helymeghatározás problémáját leíró egyenletrendszer (ismétlés).....	16
12. egyenlet: A k indexű térbeli pont referencia mintavektora és az 1-es antennához tartozó jelterjedési ideje	17
13. egyenlet: A k indexű térbeli pont mérésfüggő mintavektora.....	17
14. egyenlet: A k indexű térbeli pont mérésfüggő- és referencia mintavektorának relatív távolsága.....	18
15. egyenlet: A mintafelismerő helymeghatározó algoritmus végső becslése.....	18

7.3 TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: Az I. számú elrendezés koordináta-értékei.....	29
2. táblázat: A II. számú elrendezés koordináta-értékei.....	30
3. táblázat: A III. számú elrendezés koordináta-értékei.....	31
4. táblázat: A IV. számú elrendezés koordináta-értékei	31
5. táblázat: Az V. számú elrendezés koordináta-értékei	32
6. táblázat: A jelfeldolgozó rendszer teszteléséhez használt paraméterek.....	33
7. táblázat: Az I. számú elrendezés helymeghatározási eredményei	34
8. táblázat: A II. számú elrendezés helymeghatározási eredményei.....	34
9. táblázat: A III. számú elrendezés helymeghatározási eredményei.....	35
10. táblázat: A IV. számú elrendezés helymeghatározási eredményei	35
11. táblázat: Az V. számú elrendezés helymeghatározási eredményei.....	36
12. táblázat: Az öt elrendezés helymeghatározási eredményeinek összesítése a valós koordinátákhoz viszonyítva.....	36
13. táblázat: Az I. számú elrendezés helymeghatározási eredményei 123 mm-rel csökkentett függőleges antenna-koordináták esetén	38

8 FORRÁSOK

- [1] <http://www.netgainenergyadvisors.com/images/power-diagram.png>
- [2] BME-VET Villamos szigetelések és kisülések tárgya (VIVEMA14),
„A szigetelésekben végbemenő fizikai folyamatok” című előadás diásora
- [3] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/Plasma_wheel_2_med_DSI_R2018.jpg
- [4] Triangulation and 3D location estimation of RFI and Partial Discharge sources within a 400kV substation
 - B. G. Stewart ; A. Nesbitt ; L. Hall
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/5166337/>
- [5] Effect of sampling rate on the location accuracy of measurements from radiated RF partial discharges signals
 - O. El Mountassir ; B. G. Stewart ; S. G. McMeekin ; A. Ahmadinia
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/6221502/>
- [6] Alternative cross-correlation techniques for location estimation of PD from RF signals
 - Y. Sun ; B.G. Stewart ; I.J. Kemp
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/1491980/>
- [7] PD detection and localisation by acoustic measurements in an oil-filled transformer
 - Y. Lu ; X. Tan ; X. Hu
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/838820/>
- [8] Effect of noise on the location accuracy of partial discharges using radiated RF detection techniques
 - O. El Mountassir ; B. G. Stewart ; S. G. McMeekin ; A. Ahmadinia
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/6398629/>
- [9] Alternative cross-correlation techniques for location estimation of PD from RF signals
 - Y. Sun ; B.G. Stewart ; I.J. Kemp
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/1491980/>
- [10] Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods
 - Working Group D1.37
 - <https://e-cigre.org/publication/662-guidelines-for-partial-discharge-detection-using-conventional-iec-60270-and-unconventional-methods>

- [11] Location of partial discharge source on distribution line by measuring emitted pulse-train electromagnetic waves
- A. Tungkanawanich ; Z.-I. Kawasaki ; J. Abe ; K. Matsuura
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/847194/>
- [12] The smoothed coherence transform
- G.C. Carter ; A.H. Nuttall ; P.G. Cable
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/1451230/>
- [13] The study on the arrangement of UWB RF sensor-array for the PD location in transformers
- S. Zheng ; C. Li ; Z. Tang ; W. Chang ; R. Lu ; W. He ; Y. Jiang
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/5640868/>
- [14] Evaluation of an iterative method used for partial discharge RF location techniques
- O. El Mountassir ; B. G. Stewart ; S. G. McMeekin ; A. Ahmadinia
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/5874679/>
- [15] A simple and efficient estimator for hyperbolic location
- Y.T. Chan ; K.C. Ho
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/301830/>
- [16] Quantification of the performance of iterative and non-iterative computational methods of locating partial discharges using RF measurement techniques
- O. El Mountassir ; B. G. Stewart ; A. J. Reid ; S. G. McMeekin
 - <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779616304333>
- [17] A Combined Algorithm Approach for PD Location Estimation Using RF Antennas
- J. M. Fresno ; G. Robles ; J. M. Martínez-Tarifa ; B. G. Stewart
 - https://pure.strath.ac.uk/portal/files/66525408/Fresno_etal_IEEE_EIC_2017_A_combined_algorithm_approach_for_PD_location.pdf
- [18] Hybrid SADOA/TDOA Location Estimation Scheme for Wireless Communication Systems
- R.-T. Juang ; D.-B. Lin ; H.-P. Lin
 - <http://ieeexplore.ieee.org/document/1682995/>