

36. Országos Tudományos Diákköri Konferencia
Had- és Rendészettudományi Szekció
Budapest, 2023. április 18-20.
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Rendészettudományi Kar

Épületen belüli helymeghatározás

Jelige: *Épület2023*

Pályamunka lezárásának időpontja: 2022. november

2023.

TARTALOMJEGYZÉK

Bevezetés	1
1. Probléma vázolója.....	2
2. Lehetséges megoldások.....	4
2.1. GPS / GSM.....	4
2.1.1. Működése.....	4
2.1.2. Előnyei.....	6
2.1.3. Hátrányai.....	6
2.2. Mágneses tér térkép.....	7
2.2.1. Működése.....	7
2.2.2. Előnyei.....	8
2.2.3. Hátrányai.....	8
2.3. Proximity alapú rendszerek.....	9
2.3.1. Működése.....	9
2.3.2. Előnyei.....	10
2.3.3. Hátrányai.....	10
2.4. WiFi.....	11
2.4.1. Működése.....	12
2.4.2. Előnyei.....	13
2.4.3. Hátrányai.....	13
2.5. 5G.....	14
2.5.1. Működése.....	14
2.5.2. Előnyei.....	16
2.5.3. Hátrányai.....	16
2.6. UWB.....	17
2.6.1. Működése.....	17
2.6.2. Előnyei.....	18
2.6.3. Hátrányai.....	18
2.7. Összegzés.....	19
3. Elemzési módszerek	21
3.1. Útvészteség csatorna modell.....	21
3.2. Többutas elhalványulás csatorna modell.....	21
3.2.1. Δ - K csatorna modell	21
3.2.2. S-V (Saleh-Valenzuela) csatornamodell.....	22
3.3. Statisztikai elemzés	22

3.3.1.	Számtani közép	22
3.3.2.	Standard deviáció	22
3.3.3.	Normális eloszlás	23
3.4.	Választott módszer	23
4.	Mérési terv	24
4.1.	Célja	24
4.2.	Felhasznált eszközök	25
4.2.1.	UWB	25
4.2.2.	Lézeres távolságmérő	27
4.3.	Mérések kivitelezése	28
4.4.	Mérési követelmények	30
4.5.	Mérési környezet	31
4.5.1.	Helyszín	31
4.5.2.	Hely adottságai	32
5.	Mérések	33
5.1.	Eszközök konfigurálása	33
5.2.	Eszközök mérése	34
5.2.1.	Adatok tárolása	34
5.2.2.	Konfiguráció A beállításai	35
5.2.3.	Konfiguráció A mérések eredményei	36
5.2.4.	Konfiguráció B beállításai	39
5.2.5.	Konfiguráció B mérések eredményei	40
6.	Rendszer megvalósítás	43
6.1.	Virtuális iker megalkotása	43
6.2.	Megjelenítő grafikai program	45
7.	További fejlesztési lehetőségek	46
8.	Összefoglaló	48
9.	Summary	49
10.	Jegyzékek	50
10.1.	Irodalomjegyzék	50
10.2.	Táblázatjegyzék	52
10.3.	Ábrajegyzék	53
11.	MELLÉKLETEK	2

BEVEZETÉS

A helyzetmeghatározásnak fontos szerepe van a modern korban még akkor is, ha mindennapi, átlag felhasználóként alig érzékelünk belőle valamit. A legelterjedtebb helyzetmeghatározási lehetőség, ami mindenki számára elérhető, az a GPS és GSM. Ezeknek a technológiáknak viszont komoly hátrányai vannak. Beltéri felhasználás esetén ezek a hátrányok még jobban meglátszódnak a mérési adatok terén és ezáltal a pontosságukban is. Kültéren a telefonunkba épített GPS modult használva az eszközünk helyzetét a GPS rendszer nagyjából egy öt méteres sugarú körben tudja meghatározni. Ez természetesen változhat különböző külső tényezők által például környező épületektől, amik eredményezhetik azt is, hogy egyáltalán nem is tud a készülék csatlakozni a GPS-re vagy folyamatos jelvesztést eredményez. Ezzel szemben a nagyobb épületeken belül ez a pontosság változik egy nagyjából tíz méter átmérőjű körre, ami még pontatlanabb adatot eredményez és még inkább fennáll annak a lehetősége, hogy nem tudjuk használni a GPS-t a folytonos jelvesztés miatt. Ez leginkább az interferenciákból adódik. Az adatok nehezebben jutnak át a falakon, ami pattogtatja is és zavarja is ezeket a jeleket.

A dolgozat témája olyan technológiák megismertetése, amik lehetővé teszik az épületen belüli pontos helymeghatározást. Ezeknek a lehetséges megoldásoknak a pontossága terjedhet akár a pár métertől a pár centiméterig is. Ez természetesen a felhasznált technológiától vagy technológia fúzióktól függ és az azon belül implementálásra került módszerektől. Emellett ki kell alakítani egy valós idejű (RTLS - Real Time Location System), rendszert, ami képes a fent meghatározottakra. A rendszer folyamatos kommunikációval bír a jeladó pontos helyéről. Ezt a kommunikációt az adott technológiák lehetséges megvalósításainak módja fogja meghatározni, hogy mely technológia esetén milyen csatornán lenne ideális az adatokat továbbítani. Ezeket az adatokat a későbbiekben egy algoritmus feldolgozza, megszűri és kiszámítja belőlük a készülék pozícióját.

Egy ilyen kialakítást többségében olyan helyeken lehet hasznosítani legjobban, ahol az elemek nem statikusak. A statikusan berendezett helyeken elégséges megoldásként szolgálhat egy kinyomtatott és kihelyezett térkép vagy más egyéb hasonló megoldás, ezért ennél fogva nem lenne ideális egy ilyen rendszert kiépíteni ilyen jellegű célokra. A dinamikusan változó környezeti helyek mellett még hasznos lehet beltérben az egységek, rajok mozgásának kielemezésére, valamint statisztikai felméréseire, kutatási és fejlesztési célokra, biztonságtechnikai környezetekben való használata vagy akár raktári környezetben való árumozgás nyomon követése. Más felhasználási terület lehet egy bevásárló központban való statisztika készítése is, hogy milyen utakat jártak be a vásárlók és az egyes termékek helyének megváltoztatásával hogyan változnak meg a vásárlási szokások, de számos más területen fel lehet használni az efféle statisztikai adatokat, akár sportnál is.

Az irodalomkutatást követően a megvalósított rendszer hardveres és szoftveres működése lesz olvasható, ahol a kiválasztott eszközök, azoknak a konfigurációja és az azokra implementált algoritmusok lesznek láthatóak.

1. PROBLÉMA VÁZOLÁSA

A TDK dolgozatomat a kezdeti fázisban az vezérelte, hogy a gyárakban lévő mobilrobotok kooperatív munkát tudjanak végezni ugyanabban a légterben tartózkodó munkásokkal. Jelen helyzetben a gyárak, raktárak többségében, ahol kooperatív mobilrobotokat alkalmaznak ott ki van alakítva számukra egy külön rész. Ezeket általában csak egy földre felfestett, színes csíkkal szokták megkülönböztetni vagy pedig egy külön kialakított, szabad utat biztosítanak számukra.

Ezt az alapvető problémát továbbgondoltam a had- és hadrendészeti, valamint a mindennapi felhasználók számára való alkalmazhatóságának témakörére. Ezeken a területeken való elterjedésnek véleményem szerint nagyobb létjogosultsága van.

Mindennapi felhasználás területen navigáció szolgáltatások alkalmazása megkönnyíti a felhasználó tájékozódását és napjainkban nagy igény lenne, ha nem csak kültéren lehetne alkalmazni a navigációs lehetőségeket.

Rendészetvédelmi szempontból a technológia okostelefonokban való elterjedésével a rendőri beavatkozó egységek képesek lennének felhasználni a beavatkozás helyszínén a bent lévők mobil telefonjainak jele alapján meghatározható az egyes személyek pontos helyét. Ez a beavatkozás során életmentő információ lehet.

Katonai jellegű felhasználás szempontból segítséget nyújt a kitelepülések, gyakorlatok, vagy háborús felkészülési időszak, vagy fegyveres tevékenység esetén a tábori körülmények közötti tárolás, raktározás során. Ezekben az esetekben nem telepíthetők és alkalmazhatók a drága számítógépes raktári rendszerek. Ezzel a technológiával azonban a raktározási folyamatok felgyorsíthatók, megkönnyíthetők, a raktári kiszolgálás sokkal hatékonyabbá tehető. ami harci cselekmények során rendkívül fontos.

Kiképzési feladatokban is széleskörűen alkalmazható az épületen belüli hely és/vagy helyzet meghatározás.

A gyakorlótereken előre kiépíthető az infrastruktúra alacsony telepítési és üzemeltetési költségekkel. A gyakorlatok során a parancsnokok valós idejű információkkal rendelkezhetnek az állomány egyes tagjainak elhelyezkedéséről. A vizuális megfigyelés, valamint a harcfelelő alapján értékelheti az egyes katonák, rajok elhelyezkedését és szükség szerint adhat parancsot azok megváltoztatására. Emellett az az épületeken belüli harc megvívásának begyakorlásához is alkalmazható. Ezekben az esetekben nagyon fontos az egyes katonák magatartása, mozgása, melyet szűk helyeken, kis területeken kell elvégezni, begyakorolni. Az épületen belül és főleg a talajszint alatti helyiségekben, pincékben, alagutakban nehézséget okoz a parancsnokoknak az egyes katonák tevékenységének, mozgásának a nyomon követése, de ezzel a módszerrel valós idejű információhoz juthatnak.

Egyik ilyen mindennapi felhasználókat segítő eset lehet azoknak az emberek számára, akiknek rossz a tájékozódási készségük. Számukra egy statikusan kialakított, térképpel ellátott helyen is nehézségeket okozhat a megfelelő helyzetfelismerés és orientáció megtalálása. Ebben az esetben egy alkalmazás, ami összevan kötve egy

üzemeltetett belső hely vagy helyzetmeghatározó rendszerrel képes lehetne térkép alkalmazásként üzemelni. Egy ilyen alkalmazás mindenki számára hasznos lehet mind részben vagy teljes egészében statikus, vagy dinamikus helyeken egyaránt. Minden tekintetben statikus hely alatt azokat értem, ahol nincsen környezeti változás vagy azoknak a nagysága, gyakorisága elhanyagolható. Ilyen hely lehet például egy múzeum, ahol a műtárgyak helyzetének tekintetében nem következik be gyakori változás. Részben statikus helyek alatt olyan környezetet értek, ahol az objektumok gyakoribb, akár heti vagy havi rendszerességgel is áthelyezésre kerülnek új helyekre, például áruházak esetében.

Egy boltban való felhasználás esetén mindkét fél számára kedvező lehet ennek a technológiai potenciának a kihasználása. Felhasználói oldalról, mint potenciális vásárló, a vásárolni kívánt termékeket lehetne összesíteni egy bevásárló listává, ami alapján egy alkalmazás megtervezhetne egy kijelölt útvonalat, ami mentén ideális közlekedni a boltban belül. Az előnye az optimális útvonal alkotás is, ami által a vásárlási idő le tudna csökkenni és a boltot el tudná hagyni a vásárló anélkül, hogy az üzletben nem találta meg a keresett terméket.

A bolt részéről pedig egy ilyen alkalmazás szolgáltatásával a megfelelő jogi kereteken belül statisztikai adatokat tudna készíteni a vásárlási hajlandóságokról és szokásokról. Kísérletet tudna végezni azzal kapcsolatban, hogy az egyes termékek átpozicionálásával vagy a polcok másképpen való elrendezésével ezek a szokások és bevásárlókosarak hogyan változnának. Ezzel a vásárlónkénti profitot növelni tudnák és az egyes helyek kihasználtságát is monitorozni lehetne. A versenytársakkal szemben is előnyhöz jutnának egy ilyen jellegű szolgáltatás nyújtásával, ami még több embert vonzana be.

2. LEHETSÉGES MEGOLDÁSOK

Napjainkban számos módszert ki lehet találni, ami alkalmas hely és/vagy helyzetmeghatározásra, viszont ezekből is csak néhány van, amik ígéretesnek tűnnek valós felhasználási szempontok alapján. A következőekben csak vezetékek nélküli rendszereket fogok bemutatni.

2.1. GPS / GSM

Ez a modern közlekedésünkben a korunk egyik legfontosabb eszköze. A GPS azaz a Global Positioning System egészen az 1957-es Sputnik-1-ig nyúlik vissza. 1958-ban az amerikai haditengerészet kezdte a navigációs rendszerét fejleszteni. 1964-ben a Transit első működő rendszer elkészült. 1996-ban ezt a Navstar GPS váltotta fel, ami már polgári felhasználású volt.

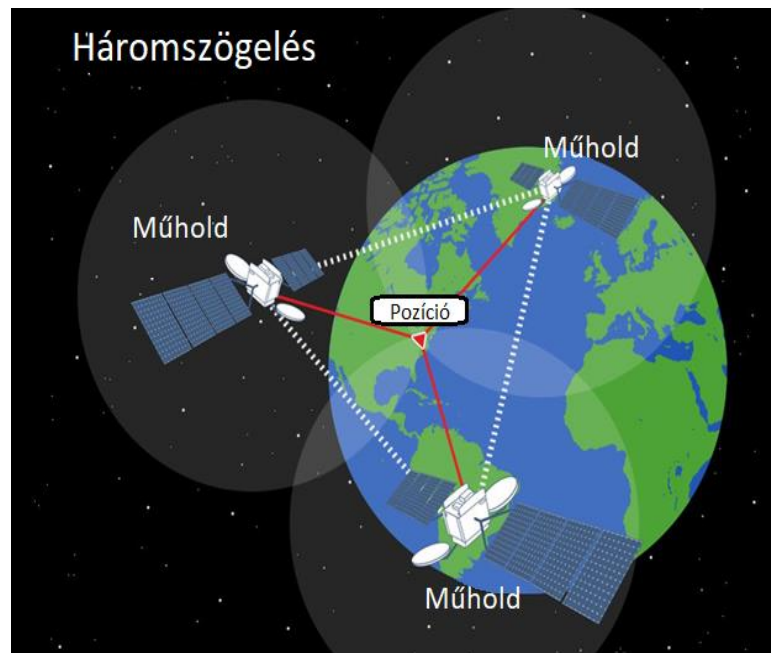
Ezekből az évszámokból is jól látható, hogy ez a megoldás már nagyon régóta kialakult és egyszerűen belátható, hogy nem lettek lényegesen tovább fejlesztve az évtizedek során működésileg.

2.1.1. Működése

A GNSS (Global Navigation Satellite Systems) egy műholdakon alapuló navigációs rendszer, aminek része a GPS (Global Positioning System) is.

Ez egy egyirányú kapcsolat, passzív rendszer a felhasználók számára, mert a felhasználók csak a műholdak jelét tudják fogni.

Minden egyes GPS műhold folyamatosan sugároz mikrohullámú jeleket az űrből a Földre, ami tartalmaz két hordozót, két kódot és egy navigációs üzenetet, amiket később a GPS vevők azonosítanak. Amikor egy GPS vevő be van kapcsolva, akkor a GPS jelet a vevőantennán keresztül veszi át. Minden GPS vevő háromdimenziós elhelyezkedési adatokat kap (szélesség, hosszúság és magasság) valamint az időt. Továbbá a GPS háromszögelési technikát alkalmaz, ami alapján meghatározza a vevőnek a helyzetét. [1] (1. ábra)



1. ábra A földgömb illusztrációja három műholddal, amelyek egy pontos helyet háromszögelnek [1]

Jelenleg 24 GPS műhold kering a Föld körül, mint az USA navigációs rendszere. Ezekből mindösszesen 21 aktív és 3 tartalék műhold. Emellett a GNSS rendszer magában foglalja az Orosz GLONASSZ, Európa Uniós Galileo-t és a Kínai Compass-t is.

Ahhoz, hogy megvalósuljon a háromszögelés, legalább három műhold által sugárzott jellefedettségre van szükségünk. Az alapvető eszközök többsége általában négy műholdnak a jelét dolgozzák fel, de vannak eszközök, amikhez már öt műholdból származó adatra van szükségünk. A műholdak Föld körüli elhelyezkedéseikből, mennyiségükből és pályáikból adódóan ezeket a lefedettségi kritériumok az esetek túlnyomó többségében biztosítják.

A felhasználói szegmens számára csak a GPS vevő berendezések érhetőek el. Ezek csak a műholdak által sugárzott jelek vételére szolgálnak. A műholdak által továbbított információkat az eszközünk a beépített vevő berendezésen keresztül fogja, amely adatokon később a készülékbe beépített szoftver elvégzi a számításokat az eszköz háromdimenziós pozíciójának meghatározásához.

Hasonló elven működnek a GSM (Global System for Mobile Communications) alapú helymeghatározási rendszerek is. Az alapok ugyanazok, azzal a fő különbséggel, hogy műholdak helyett főként bázisállomásokat használ. A mobilkommunikációs hálózati lefedettség általában jól lefedett minden országban és ezeknek az adó-vevő tornyait használja fel. (2. ábra)



2. ábra Mobil háromszögelési séma [17]

2.1.2. Előnyei

- Már mindenki számára könnyedén elérhető, kiépített rendszerek.
- Nagy lefedettséggel rendelkezik mind a GPS mind pedig a GSM.

2.1.3. Hátrányai

- Régóta nem fejlődtek kellőképpen annak érdekében, hogy pontosabbak legyenek.
- Épületen belül vagy épületekkel körbevett kültéren gyakori jelvesztési vagy jelmeztalálási problémák.
- GPS esetén nagy mértékben gyengül a jel mire leérkezik a Földre.
- GSM-nél a ritkábban lakott részek mentén előfordul, hogy nincs megfelelően kiépített telekommunikáció, ami téroró hiányt okozhat.
- Egy új rendszer vagy GPS műhold elkészítése, fenntartása a pontosság növeléséhez nagyon drága, szinte már megfizethetetlen összeg lenne.

Ezt a rendszert felválthatják vagy kiegészíthetik valamilyen módon a Starlink műholdak. Sokkal alacsonyabb orbiton, több műholdból álló konstellációt képeznek. 2021-es kutatás alapján „háromszögeléses” technikával nagyjából 8 méteres pontosságot voltak képesek elérni a kutatók [2] és ennek a pontossága egyre nagyobb ütemben fog tudni növekedni az újonnan üzembehelyezett műholdak számával.

Ez a technológia a leírt hátrányai miatt és az épületeken belüli nagyobb helyzetmeghatározási pontatlansága vagy teljese jelvetése miatt egyértelműen alkalmatlanná teszi a felhasználhatóságát, ha pontos helyadatokat szeretnénk elérni.

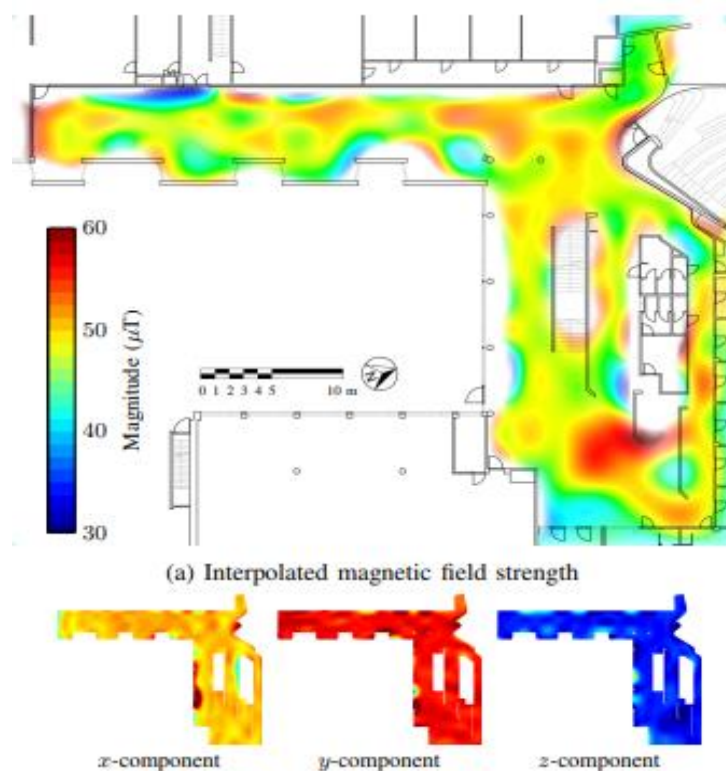
2.2. Mágneses tér térkép

Ezt a megoldást nagyjából a 2010-es évek környékétől kezdték el kikísérletezni, kikutatni.

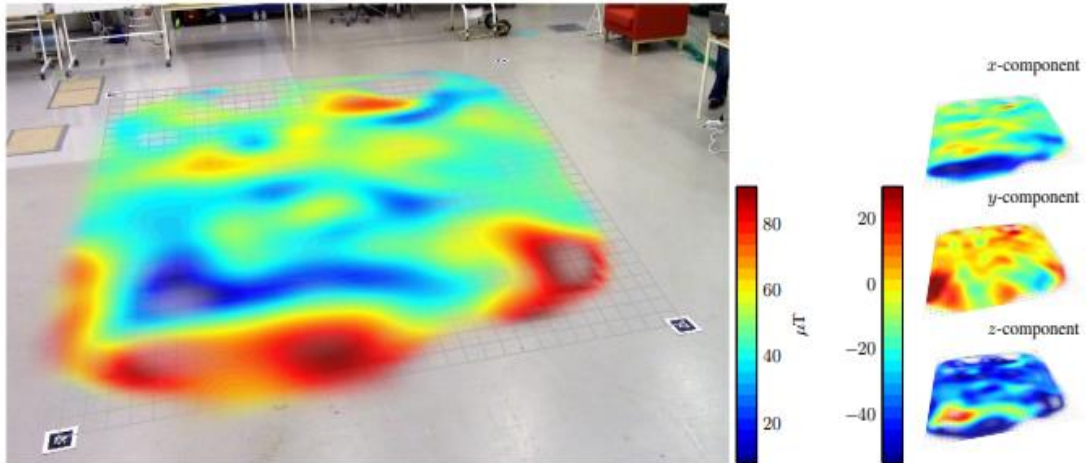
Ez egy nagyon specifikusnak nevezhető helymeghatározó rendszer, aminek nem nagyon sikerült végül teret nyernie. Leginkább kutatásokra használták, tényleges felhasználási területről nincsen tudomásom.

2.2.1. Működése

Egy beltéri környezetben a mágneses tér változását az épület szerkezete okozza. [3] Ezen mágneses tér tulajdonságain alapul a mágneses tér térképes navigációja. A pozíció megbecsléséhez az egész épületben egy háromtengelyű mágneses tért kell mérni (3. ábra). Ajánlott egy adott pozíció megméréséhez vertikális irányban megnövelni a mérőszensoroknak a számát, nagyjából a talajtól egészen emberi magasságig. A szenzorokat érdemes egyenletesen elhelyezni egymáshoz képest. Ezekből az adatokból sok, pontonkénti érték adódik ki. Ebből a mérésből már lehet készíteni egy térképet, amit később a navigálni próbáló személy fel tud használni a készülékén. A készülék a saját, beépített szenzor értéke alapján összeveti a térkép értékeivel és elhelyezi azt a térkép adott pontján. Mozgás során a korábbi értékek és az új értékek alapján megbecsüli az új helynek a pontját.



3. ábra Vektor mező komponens [20]



4. ábra Végző interpolált magnitudótérkép [20]

2.2.2. Előnyei

- Egy épület szerkezete ritkán változik és ez egy alternatíva, amihez nem kell aktív rendszert fenntartani és karbantartani csak megfelelően meg kell mérni egy alkalommal vagy változtatások után.
- Magnetométerek számának növelésével a rendszer pontossága is növekszik.
- Az okostelefonok többségében elérhető ilyen szenzor, ami lehetővé tenné a széleskörű használatának lehetőségét.

2.2.3. Hátrányai

- Önmagában használt helyzetmeghatározásra nem alkalmas, mert nagy a hibahatára.
- Mágneses tér anomáliák nagyban zavarják a működését.
- Sok pontban kell mérni az adatokat a minél megfelelőbb térkép elkészítéséhez.

2.3. Proximity alapú rendszerek

A közelség alapú rendszerek képesek érzékelni egy személy vagy tárgy általános elhelyezkedését a helyiségben egy létesítményen belül. „Ez ellentétben áll olyan precíziós rendszerekkel, mint például az UWB (Ultra Wide-Band), ami pontosan meghatározza a helyzetet egészen egy „pont a térképen” pontosságig.” [4] A közelség alapú rendszerek címkéket és jeladókat használnak a beltéri helymeghatározáshoz.

Ilyen proximity, referenciapont alapú rendszer például a BLE (Bluetooth Low Energy) vagy az RFID (Radio Frequency Identification) jeladók.

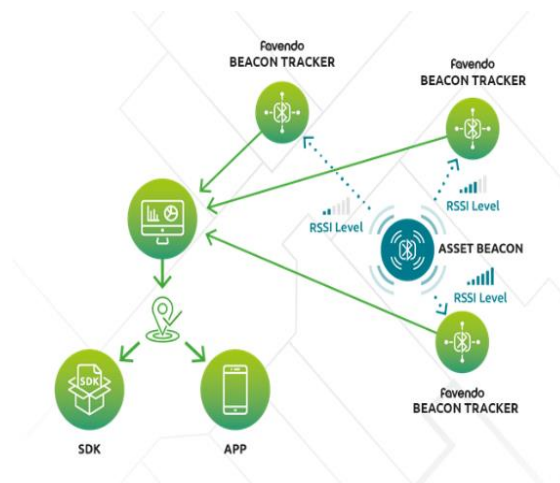
A BLE féle helymeghatározási rendszerek nagyjából a 2017-es évek környékétől kezdtek elterjedni, amikor is megjelentek az első Bluetooth 5.0 modulok. Az egyik vezető vállalat ennek a technológiának a kifejlesztésében a Nordic volt. Ennek köszönhetően sok jeladó napjainkban is a Nordic nRF52 vagy az újabb nRF53 szériájú chippek egyikével vannak ellátva.

2.3.1. Működése

„A BLE beltéri helymeghatározó megoldások BLE-kompatibilis érzékelőket vagy jeladókat használnak a továbbító Bluetooth-eszközök, például okostelefonok vagy nyomkövető címkék észlelésére és helyének meghatározására a beltérekben.” [5]

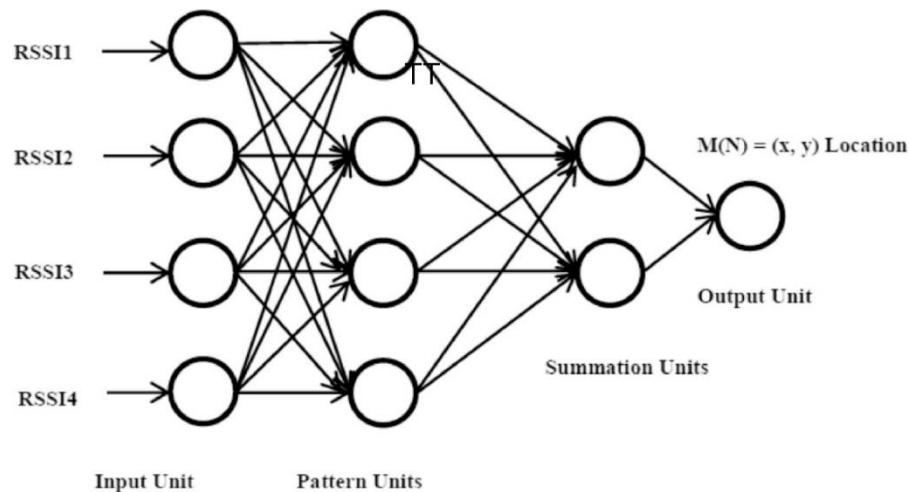
Minden egyes kihelyezett BLE jeladó folyamatosan sugároz ki magából adott frekvencián egy egyedi azonosítót. Az ilyen egységeknek általában két jelsugárzás beállítási funkciója lehetséges. Az egyik az alacsony hatótávolságú és gyorsabb adatátviteli lehetőség, ami kevesebb energiafelhasználást eredményez. A másik opció pedig a nagyobb hatótávolságú, de lassabb adatátviteli lehetőség, amihez több áramforrás szükséges.

A működésének az alapja az, hogy adott egy készülék, jelen esetben például egy okostelefon, ami képes fogni és feldolgozni a kitelepített jeladóknak a Bluetooth jeleit (5. ábra) egy dedikált alkalmazással vagy előre konfigurált szolgáltatással. Amikor a jeladó hatótávolságán belül van, akkor a készülék megkapja és értelmezi a jelet és a csomagját egy felhasználó-központú megközelítésben vagy elküldi ezeket az információkat egy szervernek, szerverközpontú megközelítésben.



5. ábra Eszközkövetés [16]

Ugyanezen a működési alapon a helymeghatározó megbecslési algoritmust van, hogy neurális hálózat segítségével fejlesztik. „Az ilyen típusú feladathoz általános regressziós neurális hálózatot szoktak használni, ami alapvetően egyfajta valószínűségi neurális hálózat, amit gyakran használnak például előrejelzésre, szabályozásra, üzemi folyamatmodellezésre vagy általános leképezési problémákra.” [6] (6. ábra)



6. ábra A kifejlesztett GRNN architektúra a javasolt célkövető algoritmusokhoz. [6]

2.3.2. Előnyei

- A Bluetooth technológia folyamatosan fejlődik és fejletnek tekinthető napjainkban.
- Szinte minden készülék Bluetooth kompatibilis, ezáltal mindenki számára könnyedén elérhető megoldást kínál.
- Egyszerű alkalmazás fejlesztés. Nem szükséges az alkalmazás elkészítéséhez tudni semmilyen háttérinformációt a kihelyezett jeladó típusáról, helyzetéről.
- Energiatakarékosak a kihelyezett jeladók. Hosszú távú üzemeltetés lehetséges egyszerű energiahordozó eszközök segítségével is akár.
- Könnyedén bővíthető, kiegészíthető a rendszer.

2.3.3. Hátrányai

- Nagy számú jeladót kell telepíteni, mivel a jel csillapítása viszonylag nagy és a hatótávolságuk alacsonynak tekinthetőek.
- A technológia tervezésekor a helymeghatározó funkciónak a kielégítésére, pontosítására nem figyeltek, nem erre lett tervezve elsősorban.

2.4. WiFi

A rendkívül pótolhatatlan és széles körben gyakran fellelhető WiFi ökoszisztéma, konvencionális életünkben mindenhol jelen van.

A WiFi világszerte fellelhető, és szinte minden vezeték nélküli eszköz és hálózati infrastruktúra használja, beleértve az okostelefonokat, IoT (Internet of Things) eszközöket, hozzáférési pontokat és még megannyi mást.

A WiFi protokoll része az IEEE 802 helyi hálózat (LAN) műszaki szabványkészletének, azon belül a 802.11 része, ami 1997-ben jelent meg és 1999-ben tisztázták, de mára az ebben foglalt szabványok jó része elavultnak számít. Ilyen elavult szabvány például az IEEE 802.11 (legacy mode). A WiFi azóta a világ egyik legfontosabb kommunikációs technológiájává vált, amely a globális kommunikáció gerincéként szolgál.

A WiFi helymeghatározás egy olyan földrajzi helymeghatározó rendszer, amely a teljes WiFi infrastruktúrát használja WiFi hozzáférési pontként az eszköz hely vagy helyzetének meghatározásához.

Az eszköz akkor is küld és fogad adatokat a közeli routerek felderítése érdekében, ha nem is vagyunk felcsatlakozva rá a készülékünkkel, így az eszközök továbbra is folyamatosan kommunikálnak, természetesen csak addig, amíg be van kapcsolva a WiFi modul az eszközünkön.

Például a Google a WPS (WiFi Positioning System) rendszert használja a GPS-követéssel együtt, hogy pontos tartózkodási helyet biztosítson, amikor megnyitja a Google Térképet. Ezt legálisan megtehetik, mert Google fiók regisztrálásakor beleegyezik a felhasználó a felhasználási feltételekbe, ami tartalmazza az ilyen jellegű adatok gyűjtését is. A Google még a helyelőzményeket is tárolja annak érdekében, hogy ezeket a későbbiekben felhasználhassa a hirdetési rendszeréhez és akár eladhassa az adatokat.

Nem a Google az egyetlen, ami kihasználja ezt a technológiai lehetőséget. Az Apple és a kisebb cégek is ugyanezt használhatják és fel is használják, hogy adatokat gyűjtsenek a felhasználókról, ahogy azt a Bluetrace [7] tette még 2015-ben.

Amikor belép egy okoseszközzel rendelkező személy az üzletbe bekapcsolt WiFi modullal, akkor valószínűsíthető, hogy a telefonját hozzáférési pontként fogja felhasználni az üzlet és innét kezdve egy WPS követni tudja valamilyen szinten a mozgását.

2.4.1. Működése

A WiFi beltéri helymeghatározó megoldások a már meglévő WiFi AP-okat (Access Point), vagy WiFi-kompatibilis szenzorokat használják fel. A beltérekben telepített, már meglévő WiFi infrastruktúrát használják a közvetítő WiFi eszközök, például okostelefonok észlelésére és helyének meghatározásához. Ez lehetővé teszi a szervezetek számára, hogy kihasználják a már meglévő hálózatukat, és lehetővé tegyék a helymeghatározás alkalmazását anélkül, hogy további hardverre vagy applikáció fejlesztésre lenne szükségük.

Különböző módszerekkel megvalósítható ez a rendszer is az eszközök helyének meghatározására. A legtöbbször a RSSI (Received Signal Strength Indicator) alapú technikát alkalmazzák.

Az érzékelőkkel, kiépített AP-kal történő pozicionálás WiFi-kompatibilis érzékelőket használ, amelyek rögzített pozíciókban vannak elhelyezve. Ezek az érzékelők passzívan képesek észlelni a környező okostelefonokból, eszközkövető címkékből, jeladókból és egyéb WiFi eszközökből érkező jeleket. Az érzékelő által összegyűjtött adatokat, RSSI számértékeket ezután elküldi a szervernek és a központi beltéri helymeghatározónak, vagyis az IPS-nek (Indoor Positioning System), vagy a valós idejű helymeghatározó rendszernek, RTLS-nek (Real-Time Location System) és az így kapott adatokat felhasználva kiszámításra kerül az eszköz pozíciója.

2.4.2. Előnyei

- A beltéri egységek előre kiépített infrastruktúrával rendelkeznek, ezért költséghatékony megoldásnak számít egy ilyen fajta rendszer megvalósítása.
- Magas adatátviteli sebességre képes egy AP, emellett más szolgáltatást is szoktak nyújtani, mint például internet-hozzáférést.
- Régóta használják, ezért sok, már meglévő applikáció, forrás elérhető hozzá.
- Nagy hatótávolsággal rendelkezik, 50 méter az optimális, de elérheti az 500 métert.
- Nagyon sok eszközben elérhető az IEEE 802.11-es protokollnak legalább az egyike ezért szinte minden készülék további módosítás nélkül fel tudja használni.

2.4.3. Hátrányai

- Biztonsági kockázatai vannak. Egy ilyen rendszer esetén védtelenek lennének a felhasználók, így nyomkövetések következhetnek be a felhasználó tudomása vagy beleegyezése nélkül.
- Meglévő infrastruktúra esetén nagyobb a pontatlanság, mert nincsen optimalizálva a jeladók elhelyezése. Kitelepített eszközök áthelyezését és/vagy bővítését igényli a pontosság növelése.
- A technológia tervezésekor a helymeghatározó funkciónak alkalmazhatóságára, pontosítására nem figyeltek, nem erre lett tervezve a technológia. Ez csak a technológiából származó adottságoknak egy felhasználási lehetősége, hozománya.
- Egy adott pontban mérés nem konzisztens adatokat szolgáltat, magas eltérési az azonos ponton, de két külön időpontban lévő mérési eredmények közötti differenciál.

2.5. 5G

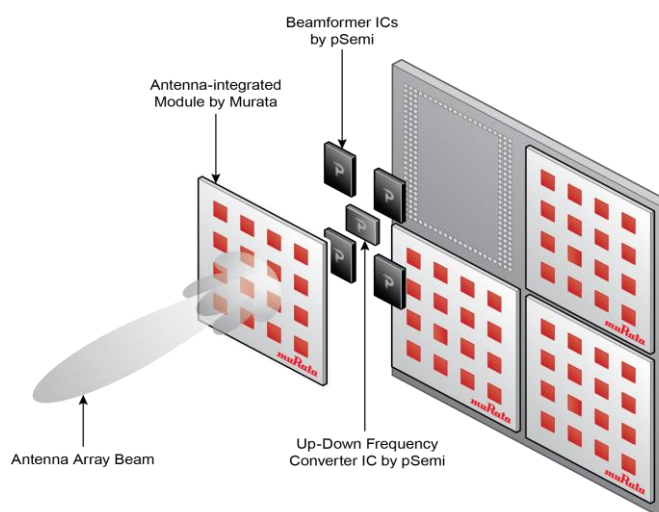
Az 5G korlátlan mobil szélessávú élményt kínál, hatalmas csatlakozási lehetőséget biztosít mindenhez, az ember által tartott okoseszközöktől az érzékelőig és gépekig, és ami a legfontosabb, képes azonnali akcióval és rendkívül nagy megbízhatósággal támogatni a kritikus gépi kommunikációt. Ez a technológia a 2019-es évek környékén jelent meg a piacon. Ez egy új, globális sztenderd a 4G hálózatok után. Ahhoz, hogy mindannyian használni tudjuk ezt, a vállalatoknak, amik ilyen jellegű vezeték nélküli szolgáltatást nyújtanak frissíteniük kell a rádióantennáikat. Ezért az 5G hálózat rohamos kiépítése minden országban zajlik napjainkban, ezt azonban lassítja az a tényező, hogy ezeknek a berendezéseknek magas a vételi, üzemeltetési, beszerelési költségük is. Emellett a telefongyártóknak olyan új chipeket kell beépíteni a készülékeikbe, amik alkalmassá teszik a készülékeiket arra, hogy az 5G hálózatot használni tudják.

Az emberközpontú és a géptípusú alkalmazások együttélése nagyon változatos funkcionális és teljesítménykövetelményeket fog meghatározni, amelyeket az 5G hálózatoknak támogatniuk kell. Az 5G rendszeren belül egyedülálló lehetőségeket kínál a mobilhálózat-üzemeltetőknek, hogy új szolgáltatásokat kínáljanak a fogyasztóknak, a vállalkozásoknak és a külső bérlőknek egyaránt.

Kínában elkezdték már a 6G-s hálózatot fejleszteni és kiépíteni. Ehhez már 2020-ban kilötte a világ első 6G szatellitjét és tízszeres vagy akár hússzoros adatátviteli sebességre képes az elődjéhez, az 5G-hez képest. Egyes szakértők szerint a későbbiekben elérheti a 6G akár a százszor gyorsabb adatátviteli sebességet is. A telekommunikációs eszközöket szolgáltatók nagyjából 2030-ra teszik ennek a technológiának a piacra lépését.

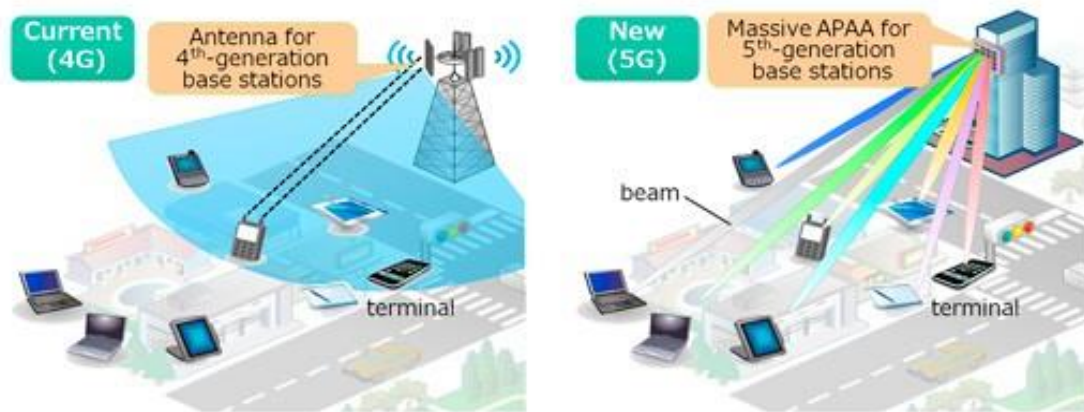
2.5.1. Működése

Az 5G MIMO (Multiple Input Multiple Output) antennákon keresztül működik (7. ábra), amelyek a többirányú adás helyett egy adott irányba precíz tájolást biztosítanak a jelnek (8. ábra).



7. ábra 5G mmWave Integrált megoldások [19]

„A masszív MIMO továbbfejleszti a MIMO-koncepciót, akár több száz vagy több ezer antennához és terminálhoz. Ez a hatalmas számú antenna egy bázisállomáson a sugár fókuszát biztosítja a felhasználók számára ahelyett, hogy a sugárzást minden irányba terítené.” [8]



8. ábra A többantennás technológia fejlődése a 4G MIMO-tól az 5G Massive MIMO-ig [18]

Az 5G a sávok széles skáláját képes kihasználni az alacsonyabb tartományoktól, például a 3G-től és a 4G-től a nagyon magas frekvenciájú sávokig.

Az 5. generációs mobilhálózaton alapuló helymeghatározást szolgáló rendszerek esetén kétfelé működtetés lehetséges. Az egyik módszer, amikor az állomás számítja ki az antenna adó adatai alapján a vevő, jelen esetünkben a mobiltelefonnak a helyzetét.

A másik módszer esetén pedig könnyű, alacsony fogyasztású, alacsony költségű, emberközpontú és megbízható eszközökön és algoritmusokon kell alapulnia, ezért ebben az esetben a végfelhasználó okostelefonján lehet futtatni egy alkalmazást, ami a pontos pozíciójának a visszaadására képes. Természetesen csak akkor érvényes ez is, ha a végfelhasználó készüléke kompatibilis ezzel a technológiával. Viszont figyelembe kell venni a működésnél, hogy az okostelefonok érzékelőinek értékei zajosak és csak korlátozott időn belül tudnak megbízható pozícióbecslést adni, ezért külső támogatásra van szükség. Ez a fajta 5G alapú beltéri lokalizációs rendszerek esetében is a szabványos módszereket szokták felhasználni, mint például a részecskeszűrő (Particle Filter - PF) algoritmus használatát.

A beltéri térképek és útválasztási gráfok relevánsak a térképegyeztetési algoritmusok, például a részecskeszűrő vagy a Kalman-szűrő szempontjából, ezzel szemben sok beltéri terület nem rendelkezik sem útválasztási gráffal, sem térképpel, amely megfelelne a követelményeknek. Az ilyen típusú felhasználásnál létre kell hozni egyet a rendszer készítőjének. A rendszer végül a végkiértékelés során a térképinformációkat és térinformatikai elemzéseket, okostelefon-érzékelők értékeit és 5G-szimulációt használja bemenetként. Ezekből az adatokból és a leírt algoritmusok segítségével nagyjából 3 méter alatti hibaértéket lehet elérni. [9]

2.5.2. Előnyei

- Növeli a jel/zaj arányt és minőségi felhasználói élményt biztosít.
- Nagy a forgalom és az adatmennyiség kapacitása.
- Széles frekvenciatartomány skálázhatóságával lehetővé teszi a tartomány lefedettségének, nagyságának rugalmasabb szabályozását.
- Az architektúrájából adódóan egy dinamikus rendszerről beszélhetünk. Jól szegmentáltak a különböző részei és flexibilisek alkalmazhatóságuk terén.
- Kulcsfontosságú paradigma a hálózati programozhatóság.
- Rugalmas alkalmazkodás különböző szinteken, beleértve az infrastruktúrát, a hálózati funkciókat, a szolgáltatásokat és alkalmazásokat

2.5.3. Hátrányai

- Jelentősen nő az alapsávi feldolgozás mennyisége az antennahasználat mértéke miatt.
- Az antennák fázisszinkronizálást igényelnek egymás között.
- Kevésbé energiahatékony az antennánkénti magas energiafogyasztás miatt.
- A csatornabecslés bonyolultsága növekszik, ahogy az antennák száma nő a kommunikációs kapcsolat mindkét oldalán.
- A 4G hálózathoz képest ötször annyi bázisállomás szükséges négyzetkilométerenként.

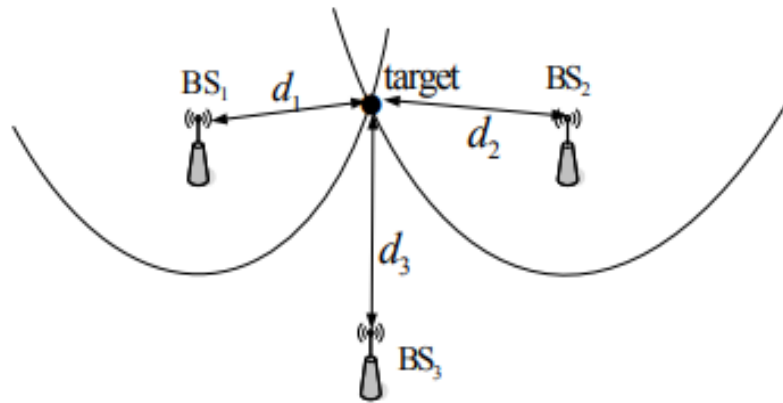
2.6. UWB

Az UWB (Ultra-Wideband) rendszer célzott alkalmazási forgatókönyve a mobil felhasználók lokalizálása beltérben, például irodahelyiségekben vagy ipari csarnokokban.

2.6.1. Működése

„Az adott alkalmazási körben, ahol nem adnak meg információt a mobiltelefon felhasználók, csak a relatív idejű módszerek alkalmasak, mint például az érkezési időkülönbség, avagy TDoA (time difference of arrival) vagy az érkezési szög, AoA (angle of arrival) és a leggyakrabban használatos az RSSI (radio signal strength identification).” [10]

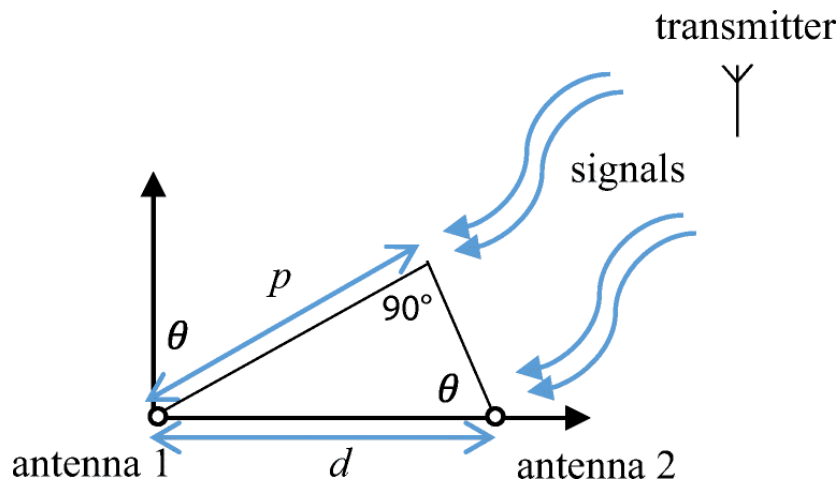
„A TDoA módszer (9. ábra) a jel terjedési idejére vonatkozó információkat kér a mobil felhasználótól (adótól) az összes hozzáférési ponthoz (vevőkhöz).” [10] A 3D pozicionáláshoz legalább négy hozzáférési pontra van szükség. Az így kapott nemlineáris egyenlethalmaz iteratív vagy direkt módszerekkel is megoldható.



9. ábra A TDoA algoritmus sematikus diagramja [22]

„Ezen kívül ez a helymeghatározó rendszer megvalósítható egyetlen alacsony költségű beltéri jeladó egységgel is.” [10] Ebben az esetben, hogy a pontos pozíció információját megkapjuk, a rendszer felhasználja a többirányú visszaverődést a falakról, így szükségtelenné válik egy hálózat telepítése vagy további jeladó hozzáadása az infrastruktúrához.

Az AoA megközelítésben (10. ábra) minden AP-ban egy antenntömböt használnak. Minden tömbelem mögé egy UWB vevőt helyeznek el, és megméri a vételi idők különbségét. Ez alapján lineáris egyenlettel meghatározható egy jel érkezési szöge. Ennél a módszernél minden AP-ban egy legalább három modulból álló, nem egy vonalban elhelyezett antenntömb szükséges a 3D lokalizációhoz, és legalább két AP-t kell használni a meghatározni kívánt eszköznek a helymegbecsléséhez.



10. ábra Érkezési szög (AoA) lokalizációs technika [21]

A TDoA rendszerben az időkülönbséget egy bizonyos alapvevőhöz viszonyítva kell kiszámítani. A címke, mobilfelhasználó egy ismeretlen $rT=[xT,yT,zT]$ pozícióban található, és ennek a helyzetét segíti(k) megbecsülni az AP(-ok) (Acces Point), ami(k) $rT=[xT,yT,zT]$ ismert helyen helyezkedő horgony(ok) (anchor).

A két módszer közül a legelterjedtebb alkalmazása az UWB esetén a TDoA, de tanácsosabb a TDoA, AoA és/vagy az RSSI kombinálása, mert így az együttműködő részek eredményessége nagyobb tud lenni, mintha csak az egyik kerülne implementálásra.

2.6.2. Előnyei

- Ellenállást biztosít a többutas terjedésekkel szemben.
- Erős interferencia-ellenes képesség, magas átviteli sebesség és jó penetráció a falakon át.
- Alacsony rendszerkomplexitás megvalósítási módszertől függően.
- Sok mérési technika, amik együtt tudnak működni és lehet fuzionálni.

2.6.3. Hátrányai

- Nagyon behatárolt teljesítmény-kibocsátási határértékekkel rendelkeznek.
- Alacsony hatótávolság a kereskedelmi használatú moduloknak.
- Nagyon alacsony számú végfelhasználó tudja alkalmazni, mert a mobiltelefonok elenyésző része rendelkezik csak a hozzá szükséges technológiával.
- A többszörös teljesítményerősítők nagy területet foglalnak el.

2.7. Összegzés

A következő táblázatban foglalom össze (2.7.1. táblázat) a fent bemutatott beltéri helymeghatározó lehetőségeknek a főbb specifikációit, ami leginkább a megfelelő technológia / technológiák kiválasztásának megértéséhez szolgál.

2.7.1. táblázat Technológiák összehasonlítása

	GPS	BLE	WiFi	5G	UWB
Kültéren működik	✓	✓	✓	✓	✓
Beltérben működik	✗	✓	✓	✓	✓
Pontosság	~ 5 m	<40 cm	~ 1.5 m	Release 16: <1 m Release 17:< 30 cm [11]	~ 10 cm
Frekvencia	1.176 GHz, 1.575 GHz, 1.227 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz, 5 GHz	28-39 GHz	3.1-10.6 GHz
Frissítési ráta	1 Hz	100 Hz	> 100 Hz		> 100 Hz
Késleltetés	250 – 2000 ms	~ 10 ms	20 – 40 ms	1 ms	<1 ms
Hatótávolság	Globális	0-100 m	50-500 m	30-460 m	0-200 m
Áramfelhasználás (adók)	Magas	Alacsony	Moderált	Magas	Alacsony
Kompatibilitás	Okostelefon	Okostelefon	Okostelefon	5G kompatibilis okostelefon	iPhone 11-től és Galaxy S21 Ultra és felette
Berendezés ára	> 200 millió \$ / szatelit	> 4 \$ / modul	> 5 \$ / modul	> 50 000\$ / kis torony és 5G cellahely	> 15 \$ / modul
Felhasználói ár	> 5 000 Ft pl: Blaupunkt Car	> 2 600 Ft pl: Blaupunkt FS 01	> 8 300 Ft pl: Nokia 130	> 60 000 Ft pl: Xiaomi Poco M3	> 200 000 Ft

A táblázatból egyértelmű okok miatt a mágneses tér térkép kihagyásra került, mert nem összehasonlítható azok alapján a paraméterek alapján, amiket figyelembe vettem a főbb összehasonlítási pontok tekintetében. Például nem lehet beszélni ebben az esetben hatótávolságról vagy áramfelhasználásról és sok egyéb esetről sem.

Az irodalomkutatás és a táblázat alapján arra a végkövetkeztetésre jutottam, hogy az 5G és az UWB technológia számít a legígéretesebbnek beltéren való precíziós helymeghatározás tekintetében. A kettő technológia közül én az UWB-et választottam a rendszerem megvalósításához. Ennek vannak a lehető legjobb tulajdonságai átlagolva számomra és kiemelkedő sajátosságokkal is rendelkezik a többihez képest.

Kiépített rendszer esetén az UWB egy sokkal olcsóbb, megfizethetőbb rendszert biztosít az 5G-hez képest, ha az 5G-s ezen szolgáltatását nem veszi igénybe számottevő ember.

A későbbiekben ezen megfontolások alapján az UWB technológiával helymeghatározó rendszer kialakításával és kutatásával fogok foglalkozni a TDK dolgozatom további részén.

3. ELEMZÉSI MÓDSZEREK

A technológiák mérési képességeikhez különböző elemzési módszereket lehet alkalmazni. Egy vizsgálat során figyelembe kell venni, hogy a vizsgált eszközök egymáshoz képest látótávolságon belüli (line-of-sight), azaz közvetlen vonal a rádióadó és a vevő között módon vannak elhelyezve vagy ennek az ellenkezője, látótávolságon kívüli (non-line-of-sight) módon helyezkednek el, amikor a rádióvevő és adó között akadályok helyezkednek el, amik zavarhatják a jelet. Az elemzések kezdete előtt meg kell határozni, hogy melyik esetet vizsgáljuk, mert különböző modellek alkalmazhatóak a két esetben, különböző közrejátszó, befolyásoló paraméterei vannak a két esetnek.

Ezen kívül lehet alkalmazni külön megadott matematikai modelleket a csatornában fellépő útvesztés vagy a többutas elhalványulás megállapítására.

3.1. Útvesztés csatorna modell

„Az útvonalvesztés-modell magában foglalja az áthatoló akadályvesztést, a látótávolságon belüli (line-of-sight) és a látótávolságon kívüli (non-line-of-sight) terjedési veszteséget.” [15]

$$P(f, d) = P(f)P(d)$$

3.1.1 Útvesztés csatorna modell

„A formulában a P az útvesztési teljesítményt, d az adó és a vevő terminál közötti távolságot, f a vivőfrekvenciát jelöli.” [15]

$$P(d) = P_0 + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

3.1.2 Útvesztés csatorna modell

„A formulában a d_0 a beltéri referencia távolságot jelenti, P_0 a rádióhullám útvesztési teljesítményét jelenti az az adótól 1 m-re lévő helyen, γ egy bomlási tényező, amely szintén a környezethez kapcsolódik.” [15]

$$PL(d) = PL_0 + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + S$$

3.1.3 Útvesztés csatorna modell

3.2. Többutas elhalványulás csatorna modell

3.2.1. Δ - K csatorna modell

$$\lambda_1 = r_1, \quad \lambda_n = \frac{r_n}{(k-1)r_n + 1}, \quad n \geq 2$$

3.2.1 Δ - K csatorna modell

„A formulában az r_n az n -edik időszelvény foglaltsági rátája. k az érkezett útvonalat jelenti tételekben.”

3.2.2. S-V (Saleh-Valenzuela) csatornamodell

„Az S-V modell leírja az érkező klaszter (az 1. útvonal) és a belső többutas útvonalat, és azt jelzi, hogy az egyes utak amplitúdójának meg kell felelnie a Rayleigh-eloszlásnak.” [15]

$$p(T_{nk}|T_{(n-1)k}) = \lambda e^{-\lambda(T_n - T_{n-1})} \quad \begin{array}{l} 3.2.2 \text{ Poisson-} \\ \text{folyamat } \lambda \\ \text{sebességgel} \end{array}$$

„A T_n és a T_{n-1} klaszterek a klaszterek (az n-edik és az n-1-edik) érkezési idejét jelentik külön-külön.” [15]

Poisson-eloszlás λ sebességgel

$$p(\tau_{nk}|\tau_{(n-1)k}) = \lambda e^{-\lambda(\tau_n - \tau_{n-1})} \quad \begin{array}{l} 3.2.3 \text{ Poisson-} \\ \text{elozslas } \lambda \\ \text{sebességgel} \end{array}$$

„Ahol τ_{nk} , $\tau_{(n-1)k}$ az n-edik és n1-edik útvonalkomponens érkezési ideje a k klaszterben.” [15]

3.3. Statisztikai elemzés

Egyszerűbb elemzési módszereket tekintve az eszközök adatait statisztikai módszerekkel is ki lehet elemezni, ami a későbbiekben segíthet következtetéseket levonni az eszköz környezeti viselkedésével kapcsolatban, amihez rá illeszkedő modell alkotható meg.

3.3.1. Számtani közép

Számtani vagy aritmetikai középértéken n darab szám átlagát, azaz a számok összegének n-ed részét értjük.

$$A(a_1; \dots; a_n) = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n} \quad \begin{array}{l} 3.3.1 \text{ Számtani} \\ \text{közép} \end{array}$$

3.3.2. Standard deviáció

Más néven standard eltérés/vagy szórás, ami az átlagtól való átlagos eltérést adja meg.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad \begin{array}{l} 3.3.2 \text{ Standard} \\ \text{deviáció} \end{array}$$

3.3.3. Normális eloszlás

Az átlag és a szórás határozza meg az alakját. A szórás meghatározza a normális eloszlás szélességét. A szórás mutatja meg, hogy az átlagtól mekkora távolságra vannak az értékek.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

3.3.3
Normális
eloszlás

3.4. Választott módszer

A dolgozatom során én a különböző elemzési módszerek és modellek közül a statisztikai elemzést választottam. Az átlagszámítás és a szórás kiszámítása lesz az adatok kielemezéseinek az alapja. Ezeknek az adatoknak a kiszámítását az elemzési módszeremből adódóan minden adatsorozatra többszörösen elvégzem.

Az átlagból és a szórásból ki tudom számolni az adott mérésre vonatkozó adathoz tartozó normális eloszlást, aminek a segítségével fel tudok rajzolni egy görbét az adatok részletesebb kielemezéséhez. Az adatokat hisztogram formában is rendeztem és az előbb említett görbe kirajzolással megvizsgáltam, hogy követi-e a haranggörbe formát. Erre azért volt szükség, mert akkor tekinthető normális eloszlásúnak a vizsgált minta, ha a hisztogram alakja megközelítőleg követi a haranggörbét.

4. MÉRÉSI TERV

4.1. Célja

A kutatásom célja olyan metodikák és pipeline-ok kialakítása, a mérési környezet felállítása, mérések kivitelezése, mérési eredményeknek a kiértékelése és a belső térről készült virtuális másolat készítésének terén, amik reprezentálják a kutatásom során elvégzett színvonalat és lehetőséget ad mások számára az egyszerű megértést és az ezen részegységek mentén való kutatásnak a reprodukálási lehetőségét.

A működő, napjainkban precíznek kijelenthető rendszer megalkotásához szükséges megemlítenem a rendszer elkészítéséhez szükséges egyes részelemeknek a céljait is a teljes, átfogó kép megértése érdekében.

Az eszközökre vonatkozó végcélom egy minél pontosabb helymeghatározásra alkalmas mérési metodika kialakítása volt és az ebből származó adatoknak a korrigálása az általam választott függvények és logika alapján. A célom a kiválasztott UWB modullal ellátott eszközöm pontosságának megbecslése az eszközből kapott adatok és a valóságban kimért adat függvényében statisztikai módszereket alkalmazva a kielemezésükhöz. Ezt az eszközből érkező távolság becslésének pontosságát a későbbiekben összevetettem a készülék gyártójának az eszköz adatlapján feltüntetett pontossággal. Logikai felépítés szempontjából ezt a lépést tartottam elsőnek, hogy az eszközt működésbe tudjam hozni és ennek az adatait elemezni tudjam és fel tudjam dolgozni ezeket, amiből később különböző statisztikai következtetéseket lehet levonni. Ennek az előnye az, hogy már az elején kiderül, hogy mit is tud valójában az eszköz, a gyártó által ígért teljesítményt betartja-e vagy nem.

Céljaim közé tartozik többek között a különböző konfigurációs lehetőségeknek a megvizsgálása, hogy adott konfigurációban mire lehet számítani. Ilyen például az eszközön beállított konfigurációból keletkező hatótávolság, amin belül az eszközzel lehet mérni vagy a méréseknek a pontossága, amit az eszköz konfigurációs beállításait úgyszintén befolyásolják. Emellett után-feldolgozó egyéggel a kimenő adatoknak a tovább finomítása is cél, hogy a valósághoz minél közelebb álló adatokat szolgáltatson az egység. Erre azért van szükség, mert a predikcióm szerint minél pontosabban tudnak távolságot mérni a különálló UWB egységek, úgy várhatóan az az egész rendszer pontosságában is szemmel látható pontosság növekedést fog eredményezni.

A TDK dolgozatomban megvalósításának másik részegységének a célkitűzése az, hogy egy vizuális megjelenítésre képes programban egy megadott sémát követve egyszerűen elkészíthető legyen a beltér másolata és a mért adatokat meg lehessen jeleníteni ebben a virtuális környezetben. Ebben az esetben fontos egy a feladat kivitelezéséhez alkalmas, olyan vizuális megjelenítő program használata, ahol implementálva van minél több olyan egység például az elkészített modell importálásához szükséges eszköz vagy a valósághoz minél közelebb álló fizika megvalósítás, ami a későbbiekben a megjelenítéshez vagy a rendszer további fejlesztéséhez alkalmasak lehetnek.

4.2. Felhasznált eszközök

4.2.1. UWB

A TDK dolgozatom írásának idejében az egyik legelterjedtebb chipek, amiket felhasználnak azok a DW1000, DW1001 és a DW3000. Ezeket a Qorvo cég készíti. Emellett az NXP Semiconductors, 3DB Access/Microchip és a STMicroelectronics is a főbb chip szolgáltatók körébe tartoznak. [12] Az előbb felsoroltak, mint például a DW1000 magukban csak maga a rádió chipeket jelölik. Viszont ilyen jellegű eszközök keresése során leggyakrabban a DWM előtaggal lehet találkozni a DW helyett.

A DWM elnevezésű eszközök nem csak az UWB modulokat tartalmazzák, hanem ezeknek a moduloknak általában egy lapkakiosztáson belüli más eszközökkel való integrációját is. Ilyen más eszköznek számíthatnak általában az antennák és a mikrokontrollerek. Az eszközök integrációi során figyelnie kell a tervezőnek arra, hogy a megfelelő modulok a megfelelő részekkel legyenek összekötve. A DWM maga a kész termék, aminek részelemeihez a felhasználó a mikrokontrolleren keresztül fér hozzá és azon keresztül tudja programozni.

A felsorolt három modul közül a DW1000 a Qorvo cégnél a legrégebb óta elérhető UWB modulja, ezáltal több dokumentáció is fellelhető róla mind a gyártó oldaláról, mind pedig a közösség által leírtak alapján. Ez nagy előnyt jelent, ha egy specifikus hiba lépne fel a folyamat valamelyik szakaszában és megoldást kell rá találni vagy el akarunk mélyülni a működésének a megértésében. A modulhoz tartozó könyvtárak tárháza is nagyobb, amik tartalmazzák az eszköz funkcióinak eléréséhez szükséges kódokat. Van a gyártó által szolgáltatott hivatalos könyvtár, de ennél is találhatóak az interneten a különböző egyének vagy közösségek által továbbfejlesztett vagy átalakított könyvtárak. Emellett több hasonló rendszer implementációt és kutatást is végrehajtottak már ezzel a típussal, ezért a kapott eredményeimet össze lehet hasonlítani másnak az eredményeivel.

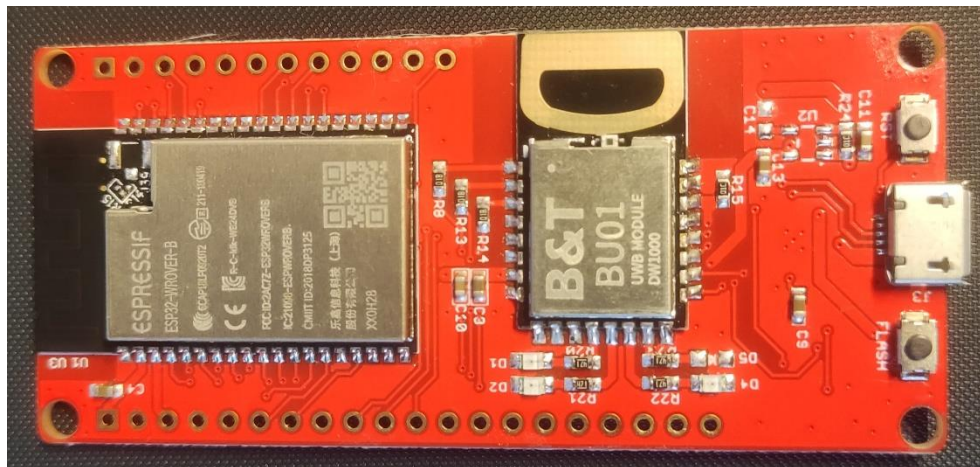
Hátránya az általam választott DW1000 modulnak viszont az, hogy az újabb például DW3000-es modulhoz képest ez nem kompatibilis az Apple készülékekben lévő UWB modulokkal, az U1-esekkel, mert ebben még nem kerültek implementálásra az ehhez szükséges kommunikációs protokollok.

A DW3000-et összehasonlítva a DW1000 sok eltérés nem észlelhető teljesítmény szempontjából, mindösszesen csak az új rádió adó-vevő fejlesztésnek köszönhetően kevesebbet fogyaszt a készülék és az adott módon belül kicsit jobban teljesít. [13] Mérlegelve az előnyöket és hátrányokat a választásom a DW1000-re esett.

Említésre került, hogy önmagában egy DW modul nem képes mérésekre, mert kell hozzá egy környezet, amibe integrálni lehet ezt.

Az én választásom egy olyan DWM1000 volt, ami egy ESP32-vel került összeintegrálva. (11. ábra)

Az egyik előnye ennek az, hogy az ESP fel van szerelve egy beépített WiFi modullal, ami az adatok vezeték nélküli továbbítására a későbbiekben szükség lehet.



11. ábra ESP32 UWB eszköz

4.2.1. táblázat DW1000 specifikáció

DW1000 specifikáció [17]	
Csatornák száma	6
Sávszélesség	3.5Ghz-6.5Ghz
Adatátviteli sebesség	110 kbps, 850 kbps, 6.8 Mbps
Maximális csomaghossz	1023 bytes
Támogatott megvalósítás	TDoA, TWR
Tápfeszültség	2.8V-3.6V

4.2.2. táblázat ESP32-WROVER-B specifikáció

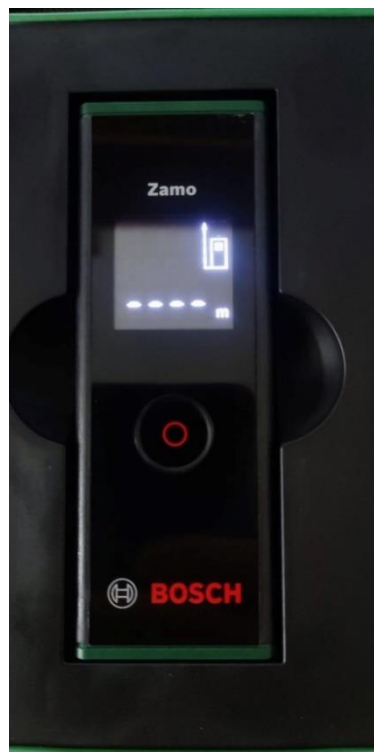
ESP32-WROVER-B specifikáció [14]	
CPU	ESP32-D0WDQ6
CPU órajel frekvenciája	80MHz~240MHz
Minimális áramerősség	500 mA
GPIO	24
PSRAM	8 MB
Flash	16 MB
Működési hőmérséklet tartomány	-40 °C ~ 85 °C

4.2.2. Lézeres távolságmérő

Célszerű egy minél pontosabb távolságmérő eszköznek a kiválasztása a terület minél pontosabb kiméréséhez és az adatok érvényesítéséhez. Ebben az esetben én egy lézeres távolságmérőt használtam fel hagyományos mérőeszköz, például mérőszalag helyett.

Az általam választott lézeres távolságmérő egy Bosch Zamo (12. ábra), ami 20 méteres távolságig képes mérni. Kiválasztási szempontoknál fontos volt az ár / távolság arány figyelembevétele és az eszköz hibahatára.

Az eszköz egyik hátránya az, hogy nincsen USB kimenete, amin keresztül a mért adatokat napló-történetezni lehetne. Egy ilyen funkció a valós idejű helymeghatározás esetén segítené sokat a rendszer, valamint az egyes készülékek pontosságának megbecslésénél.



12. ábra Bosch Zamo lézeres távolságmérő

4.2.3. táblázat Bosch Zamo specifikáció

Bosch Zamo specifikáció [15]	
Mérési tartomány	0,15 – 20,00 m
Mérési pontosság	$\pm 3,0$ mm
Mérési idő	0,5 s
Maximális mérési idő	4 s
Portok	Nincs

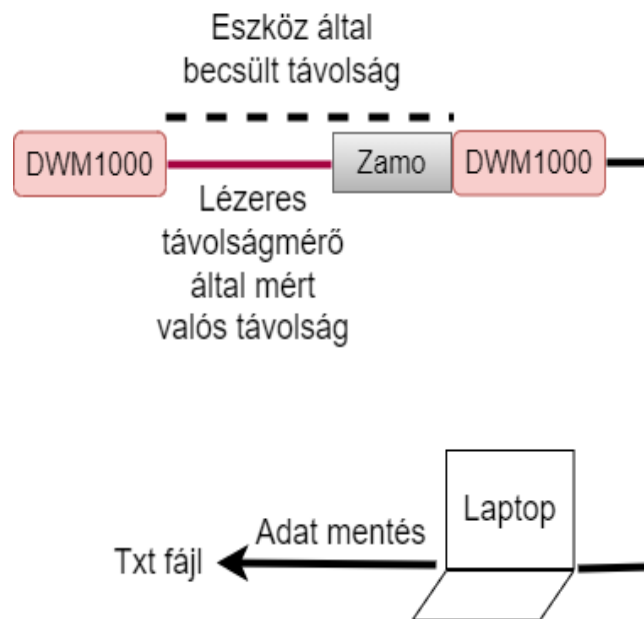
4.3. Mérések kivitelezése

A mérések megkezdése előtt meg kellett alkotnom egy olyan rendszertervet, ami csak a mérések folyamatára, metodikájára vonatkozik. Az alábbiakban vázolt mérési metodikát fogom részletezni, ami mentén elvégeztem a moduloknak a vizsgálatait.

A modulok vizsgálatát különböző módon lehet elvégezni, aminek a módszereit csak az eszközválasztás keretei szabnak határokat. Az általam választott UWB modul egy ESP32-vel van egy lapkára integrálva, ami rendelkezik egy integrált WiFi modullal és beépített antennával. A lapkán emellett megtalálható még egy USB Micro bemeneti port. Ebből adódóan külön új eszköz bevonása nélkül ez a kétfajta kommunikációs lehetőség áll rendelkezésemre adatok gyűjtéséhez.

A vizsgálatom során én az eszköz USB Micro portját használtam adatátvitelre. A képen látható (13. ábra) módon elhelyeztem a tag-et vagy tag-eket egy platformra, ami a kép bal felső sarkában látható egység reprezentál. Ezt egy, a lézeres távolságmérő által kimért pontban a horgonyhoz képest helyeztem el. A lézeres távolságmérőt és a horgonyt reprezentáló elemek a kép jobb felső sarkában figyelhetők meg.

Figyelembe kell venni a mérések során azt is, hogy a lézeres távolságmérőnek melyik



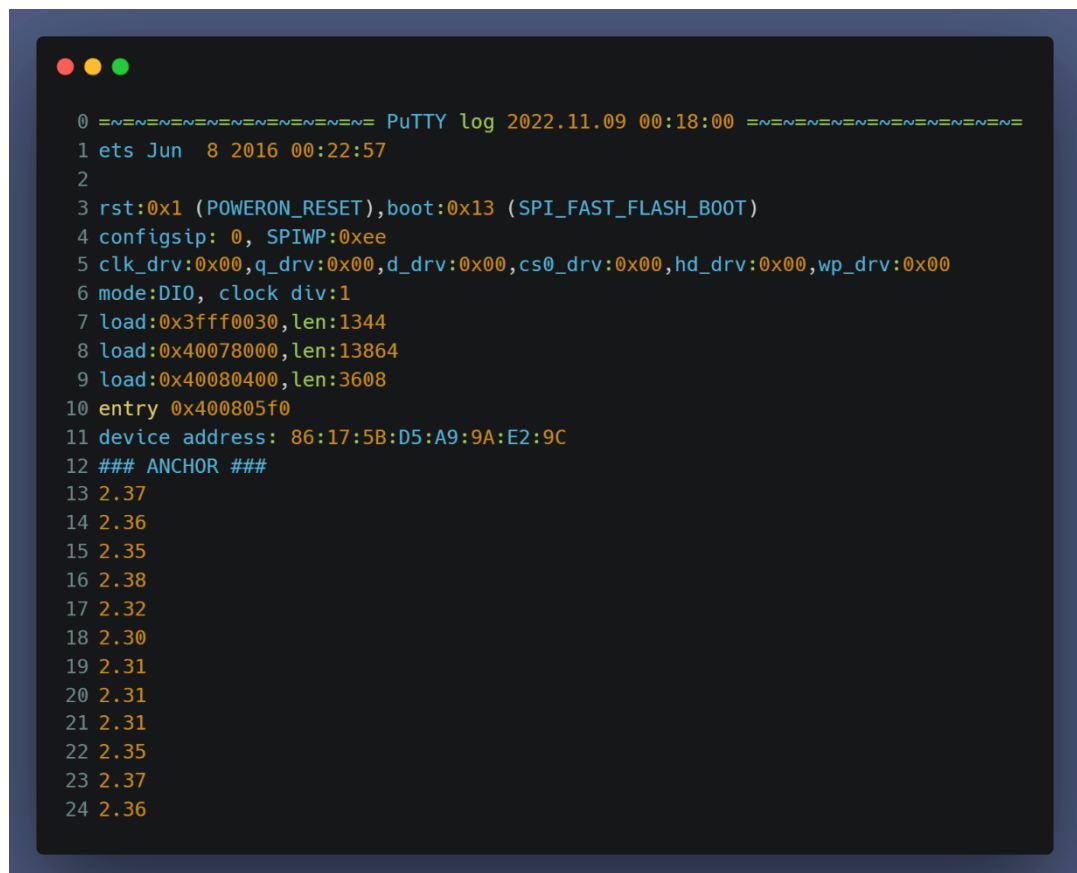
13. ábra Eszközök mérési folyamatábrája vezetékes módon

pontja a 0 pont, ahonnan számítja a távolságot. Jelen esetben ez az eszköz tokozásának a szélén helyezkedett el. Ezután figyelembe kell venni, hogy miként van pozicionálva a mögötte elhelyezkedő UWB modul. Mivel a lapkának is van egy szélessége ezért nem elhanyagolható az a tényező sem, hogy a távolságmérő tokozása és az eszköz antennája között mekkora a távolság.

A horgonyt összekötöttem jelen esetben egy lappal vezetékes módon. Ez az összeköttetés biztosítja a horgony számára mind az áramellátását, mind pedig az adatátvitelt a laptop és modul között. A DWM1000 esetében az ESP32 kommunikál mind

a DW1000-es UWB modullal mind pedig a lappal. Elsőlegesen ez egy átjáróként szolgál a gép és a modul között, amin keresztül konfigurálható is az UWB modul.

A lapon a soros portra, a horgonyból, az ESP32-án érkező adatokat lementettem egy külön txt fájlba. Az eszköz konfigurálásánál meg lehet adni, hogy milyen adatokra van szükség és ezeket ki lehet íratni a felhasználó számára. Ezek a kiíratott adatok fognak megjelenni a soros porton keresztüli olvasás során is. Ez a txt fájl csak az általam legfontosabbnak tartott adatot tartalmazza, mégpedig a double (14. ábra) értékeket. Ezek az eszköz által megsaccolt távolság értékek. Ennek a beállítása jelen dolgozatomban csak a későbbi feldolgozó egység számára fontos.



```
0 ===== PuTTY log 2022.11.09 00:18:00 =====
1 ets Jun  8 2016 00:22:57
2
3 rst:0x1 (POWERON_RESET),boot:0x13 (SPI_FAST_FLASH_BOOT)
4 configip: 0, SPIWP:0xee
5 clk_drv:0x00,q_drv:0x00,d_drv:0x00,cs0_drv:0x00,hd_drv:0x00,wp_drv:0x00
6 mode:DIO, clock div:1
7 load:0x3fff0030,len:1344
8 load:0x40078000,len:13864
9 load:0x40080400,len:3608
10 entry 0x400805f0
11 device address: 86:17:5B:D5:A9:9A:E2:9C
12 ### ANCHOR ###
13 2.37
14 2.36
15 2.35
16 2.38
17 2.32
18 2.30
19 2.31
20 2.31
21 2.31
22 2.35
23 2.37
24 2.36
```

14. ábra Soros port kimeneti log txt fájl

4.4. Mérési követelmények

Az előző fejezetben (4.3. Mérések kivitelezése) leírtaknál megpróbáltam összefoglalni mindazt, amit egy mérés során figyelembe vettem és hogy hogyan alakítottam ki általánosságban egy mérésemet. Ez tartalmaz mind a mérési rendszer kialakításáról alkotott alapképet, mind pedig pár tényezőt, amit úgy találtam, hogy érdemes figyelembe venni az adatok és elemzésem validálhatóságához egyaránt. A következőkben a bemutatottak alapján meghatározom azt, hogy mely méréseket tekintettem sikeresnek a dolgozatom során.

A mérések megtervezése során fontos volt a kivitelezés és adatok gyűjtése előtt felállítanom egy követelménylistát, amin meghatározom, hogy milyen feltételek teljesülése esetén tekintek egy mérést és az azon belüli méréssorozatot sikeresnek.

Egy mérés során a legelső feltétel egy általam meghatározott mérési szakasz megadása, ami maximálisan 20 méterig terjedhet, de nagyban befolyásolja a szakasz hosszát az UWB eszköz konfigurációjából adódó maximális hatótávolság. Ezután a szakasz hosszának és az alátámasztani kívánt értékek és az ehhez használni kívánt statisztika figyelembevételével a szakasz felosztása mérési pontokká. Ezeken a pontokon végzem el az egyes eszközökkel a méréssorozatokat. Az eszközből érkező adatok minél jobb alátámaszthatósága miatt két tényezőt vettem figyelembe.

Az egyik tényező az, hogy nem elégséges egy eszközből származó adatot vizsgálnom, mert fennállhat annak az esélye, hogy ugyanazon modul, ugyanolyan feltételek mellett más adatot szolgáltat. Az szakirodalom kutatás során találkoztam olyan eszközzel, ami ki és bekapcsolás után ugyan abban a környezetben lényegesen más adattal szolgált, ezért ennek az eshetőségnek a vizsgálatához és kizárásához egyszerre több eszközből érkező adatot kell figyelembe vennem és feldolgoznom. A felhasznált eszközmennyiséget az alapján határoztam meg, hogy egy „háromszögelés” esetén legalább 3+1 eszközre van szükség, másrészt pedig 5 eszközzel rendelkezek a TDK dolgozatom írásának idejében, ezért három eszköz adatainak vizsgálata mellett döntöttem (3+1 felállítás).

A másik tényező pedig az adatmennyiség meghatározása, amik az adatok kielemezéséhez szolgálnak. Ebben az esetben a választott elemzési technikától eltérően számszerűsíteni lehet, hogy mennyi adatra van szükség. Az én elemzési módszeremhez méréssorozatonként egy nagyjából 120-tól egészen 400-ig terjedő adatmennyiséget szabtam meg. Egy mérési pontban elvégzett méréssorozat esetén ennyi adattal már lehet statisztikai számításokat végezni és elég nagy merítés ahhoz, hogy az általános viselkedés megfigyelhető és alátámasztható legyen.

Fontosnak tartottam emellett, hogy a horgony elé elhelyezett lézeres távolságmérőnek a pontja a mérni kívánt címkének az antenna részére essen. Ezzel egy síkban történő mérést létrehozva, aminek az előnye az eszközök egymástól való távolságainak meghatározása és az adatok feldolgozásánál egy síkban történő mérésként értelmezhetőek az adatok.

4.5. Mérési környezet

Fontos a helyszín kiválasztása esetén egy olyan helyet választani, ami az eltervezett mérésekhez a legideálisabb adottságokkal rendelkezik. A TDK dolgozatom esetén én csak egy helyszínt választottam ki a mérések elvégzésére. Ezt a legfontosabb kritériumaim teljesülésének szempontja szerint választottam ki. Az általam felállított legfontosabb kritériumok: legyen egy legalább 20 méter hosszú egyenes szakasz, amit nem tör meg semmi és lehetőség szerint kevés olyan befolyásoló tényező legyen a helyen, ami a méréseket manipulálná.

4.5.1. Helyszín

A dolgozatom során az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Kollégiumának (Budapest, Bécsi út 104, 1034) az első emeleti Robert Bosch közösségi terét választottam. (15. ábra)



15. ábra Kandó Kálmán Kollégium Robert Bosch közösségi tér

4.5.2. Hely adottságai

Ennek a helyszínnek a kiválasztási okai közé tartozott még a magas beltér, a megfelelően kiépített elektromos hálózat az eszközök üzemeltetéséhez, a kevés környezeti befolyásoló tényezők száma, egymástól távol elhelyezkedő falak és a helyszínen rendelkezésre álló, mozgatható környezeti elemek, bútorok voltak.

Ezeknek a környezeti elemeknek (16. ábra) és/vagy bútoroknak a felhasználásával következtetéseket tudok levonni azzal kapcsolatban, hogy mennyire befolyásolják ezek a mérések eredményeit.

Méréseim során ezeknek az elemeknek a pozícióját változtattam és az eszközök elhelyezése során különböző anyagból készült platformra helyeztem el a UWB modulokat. Megfigyeltem a különböző anyagok tulajdonságai alapján észlelhető mérési elváltozásokat és ezekből levontam egy konzekvenciát, hogy a modulokat mely anyag típusra helyezve befolyásolja legkevésbé a mérések végkimenetelét.



16. ábra Mozgatható környezeti elemek

5. MÉRÉSEK

A mérések során felhasználásra kerülnek a fentebb említett eszközök és az említett program, ami kiértékeli és megjeleníti a kapott eredményeket.

Ebben a fejezetben arról fogok írni, hogy hogyan konfigurálom fel az egyes UWB modulokat és ezeknek az adatait miként naplózom és dolgozom fel.

Két külön pipeline-ból áll ez rész. Az egyik része az általam leírt méréstechnika, ami mentén végzem a méréseket és lementem az abból kapott eredményeket. A másik része pedig a megfelelő adatoknak a feldolgozási része.

Ez a két pipeline az adatok mentén képeznek egy függőséget, mert ha nem megfelelő az általam jónak ítélt adatmentési struktúra akkor a feldolgozó részen történhetnek problémák. Olyan problémára kell gondolni, mint például a program nem képes felismerni melyik mérési pontnak az adatait dolgozza fel és még számtalan ehhez hasonló probléma előállhat.

5.1. Eszközök konfigurálása

Ennek a megvalósításában segítségemre válik az eszközgyártó és a felhasználói közösségnek az eddigi munkája olyan értelemben, hogy léteznek az általam választott modulhoz könyvtárak, amik közül választanom kell és mindösszesen csak be kell importálnom ezt abba a keretrendszerbe, amiben felprogramozom a készülékeimet.

Én az Arduino IDE 2 keretrendszerét használom fel ehhez. Az Arduino IDE 2 (17. ábra) egy 2022 második félévében megjelent program, ami egy részben az Arduino IDE átdolgozása vizuális tekintetben, de emellett helyet kapott benne olyan hasznos funkció is, mint például az automatikus kiegészítés/vagy a következő „definíció” megtekintése és a hibakereső (debugger) mód is.



17. ábra Arduino IDE 2

Az eszközökön futtatott kódok nagyrésztben mások által előre megírt részekből állnak, amiken minimális változtatásokat hajtottam végre. Ilyen változtatás például az, hogy milyen adatokat írjon ki a soros monitorra.

Ezen kívül megnéztem a forráskódban, hogy milyen módok elérhetőek az elindításuk során és a számomra felesleges, megírt metódusokat töröltem.

Előre meghatározott üzemmódokból a könyvtárban hat darab van. Ezeknek a tartalma 3 bájt az adatátviteli sebességhez, az impulzusfrekvenciához és a preamble hosszához.

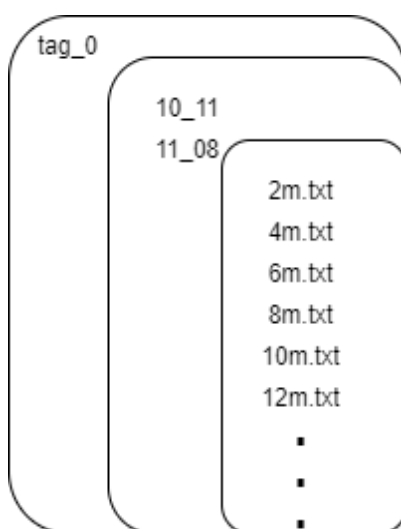
Két darab háromfős csoportra bonthatóak fel ezek az üzemmódok. Az egyik csoportnak az üzemmódjai a kis teljesítményű fogyasztást biztosítja, a másik csoportja pedig a minél nagyobb pontosságot részesíti előnyben. A magasabb pontosság esetén jóval magasabb az átviteli impulzusfrekvencia, ugyanis ez 64 MHz az energiatakarékosabb üzemmód 16 MHz-ével szemben.

5.2. Eszközök mérése

A méréseim során minösszesen csak a távolságot irattatom ki az eszközzel méter egységben. Ez egy két tizedesjegyig terjedő számérték. Ezt a formátumot azért választottam, mert az ezt feldolgozó program rögtön be tudja olvasni a számértékeket a mentett állományból és máris tud velük tovább dolgozni.

5.2.1. Adatok tárolása

A tárolásához kialakítottam egy fájl hierarchiát. Minden horgonynak és címkének van egy külön mappája. Ezeken belül található egy almappa, aminek a neve az elvégzett méréseknek a dátuma és ezen a mappán belül vannak a .txt fájlok A lézeres távolságmérő által kimért táv a .txt fájl neve, amin belül vannak az eszköz által továbbított adatok. (18. ábra)



18. ábra Adatok tárolása hierarchia példa

5.2.2. Konfiguráció A beállításai

Az első mérésem eszközkonfigurációja során én az üzemmódok közül a rövid adathosszak, gyors átviteli sebesség és nagyobb pontosságot választottam ki és kikapcsolva hagytam a kapott távolság adatok simítását.

A gépet egy USB-n keresztül összekötöttem az egyik végével, a horgonnyal. Ez lehetővé teszi, hogy a gépen kiosztott portján keresztül monitorozzam és lementsem az eszköztől kapott adatokat egy Putty nevezetű program segítségével a gépre.

Ezeket a méréseket egy 20 méteres távon keresztül végeztem volna el, de a mérések során kiderült, hogy ebben a konfigurációban az eszköz 8 méteres távolság után elveszíti a jelet. Ezt a 8 méteres távolságot felbontottam egyméteres szakaszokra, amik a mérési pontokat jelölik. (20. ábra Konfiguráció A mérés felállítása). A nulladik pontban sosem végzek mérést, mert inkonzisztens adatokat ad vissza az eszköz. Ezt a tesztekben következtettem ki, hogyha nagyon közel van egymáshoz a horgony és címke akkor nem képes a megfelelő távolságmérésre. Ezeket a felbontásokat (1 méteres szakaszokat) egy lézeres távolságmérő segítségével mértem ki.

A mérés folyamatáról készült kép az alábbi (20. ábra) ábrán látható. Ez a féle kialakítás olyan szempontból volt előnyös, hogy könnyű, műanyag elemeket és szivacsokat alkalmaztam az eszközök elhelyezéséhez. Ez a környezetből adódható hibalehetőségek minimalizálása miatt lett így kialakítva. Fém felületen való elhelyezés során nem feltétlen kaptam valós eredményeket.



20. ábra Konfiguráció A mérés felállítása

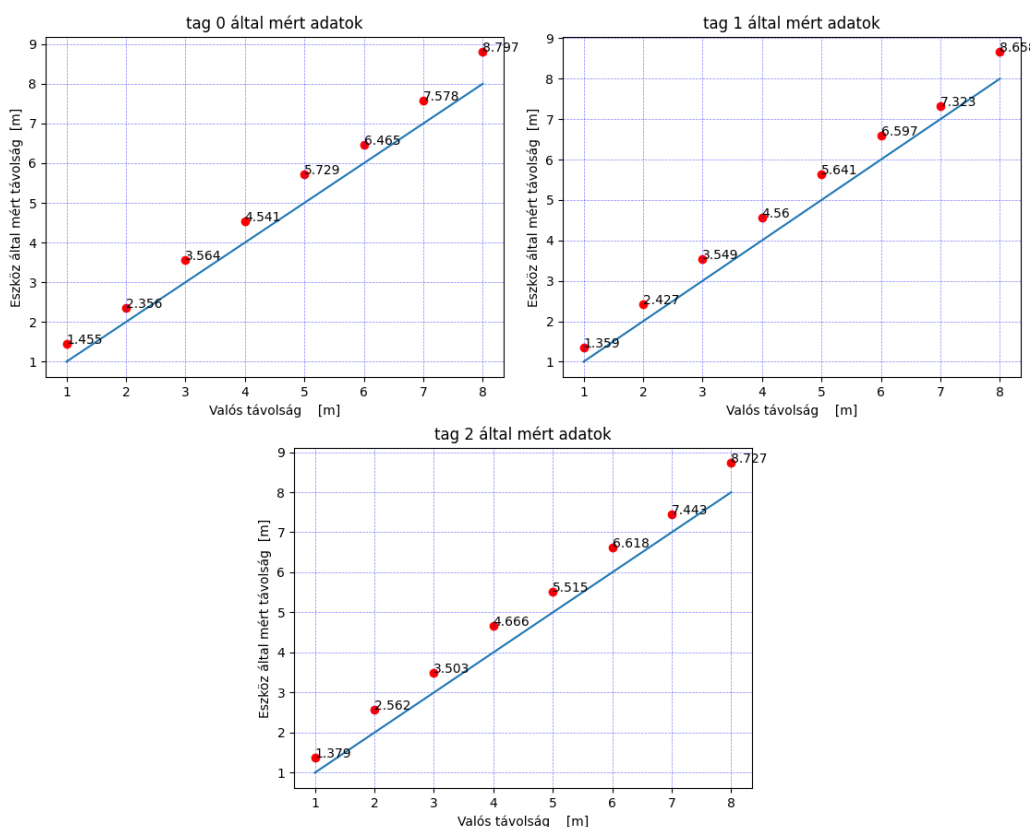
5.2.3. Konfiguráció A mérések eredményei

Az Elemzési módszerek-ben meghatározott Statisztikai elemzés módszereket alkalmazva meghatároztam, hogy mekkora az átlaga a méréseknek. A dolgozatomban két átlag típust különböztetek meg, a „kompenzáció nélküli átlag” -ot és a „kompenzációs átlag” -ot. A kompenzáció nélküli átlageredmény az eszközről érkező adott mérésorozat alapján számított átlagnak felel meg. A kompenzációs átlag a programom által utólagos adatkorrekcióval ellátott kimeneti eredményeknek az átlaga.

Az adatok kiértékelése során a következő statisztikai adatokat kaptam meg: Az alábbiakban a programom által generált gráfok és adatok lesznek láthatóak és ezeknek az elemzése. (21. ábra, 22. ábra, 23. ábra)

- A tag 0 kompenzáció nélküli átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.560625 méter.
- A tag 1 kompenzáció nélküli átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.51425 méter.
- A tag 2 kompenzáció nélküli átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.551625 méter.
- Az eszközök átlagos kompenzáció nélküli hibájának átlagolásával megkapjuk, hogy átlagosan nagyjából 0.542125 métert téved az eszköz.

A méréspontonkénti valóságtól való átlagos eltérésről készítettem korrelációs diagrammokat az egyszerűbb elemzéshez, következtetések levonásához és a korrekció utáni fejlődésnek reprezentálásához.



21. ábra Konfiguráció A kompenzáció nélküli eltérések

Ezekből a gráfokból és pontosságok becsléséből megállapítható, hogy mindegyik eszköznek a mérési pontossága közel azonos és az eszközök többszörös újraindítása sem befolyásolja ezt a tényezőt.

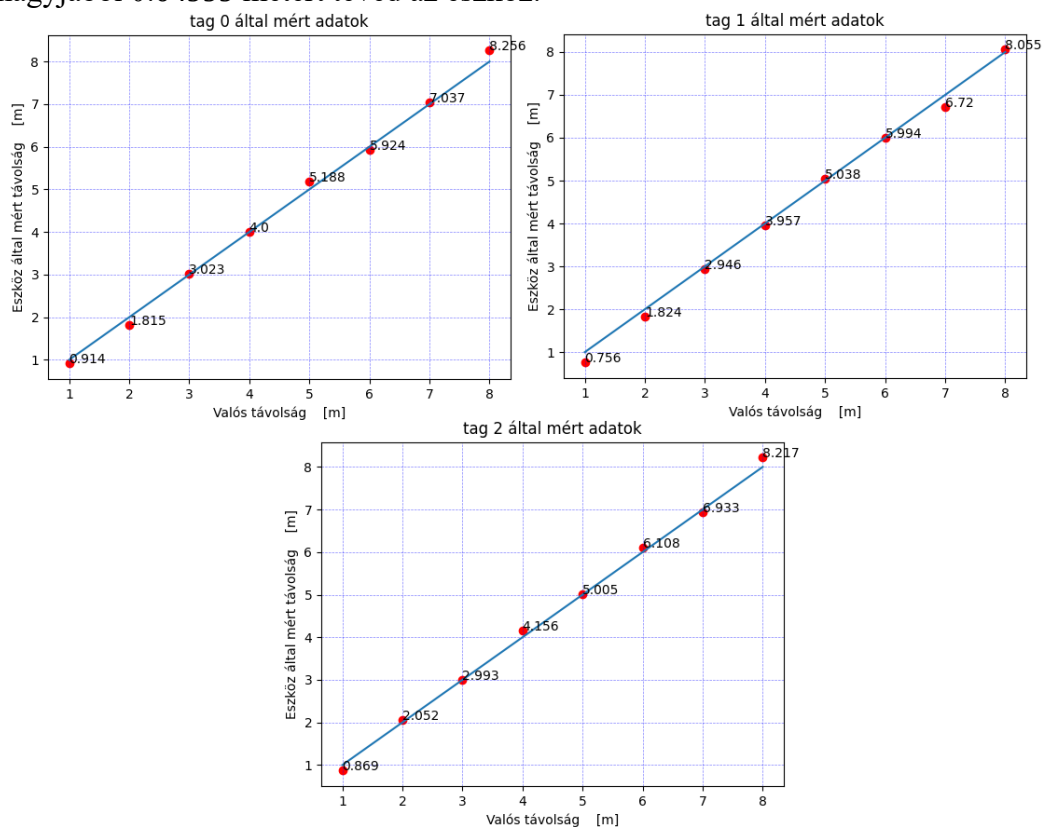
A tényleges pontossága természetesen nem 0.5 méter. Ez csak az eszköz alapszintű felkonfigurálásából adódó értékek. Ennek az egyik oka az lehet, hogy a készülékhez szolgáltatott hivatalos, gyártói könyvtár nem tartalmazza az antenna késleltetéséből következő kalibrációt.

Érdemes már a konfigurációkor elvégezni ezt az antenna késleltetési kalibrációt és/vagy a gépen való adatfeldolgozásnál figyelembe venni ezt és azt, hogy jelen esetben ennél a három mért készüléknél átlagosan 0,54 méternyi túllövés észlelhető.

Ezeknek a kimenetelét lehet befolyásolni mind az eszközön futó program változtatásával mind pedig az utófeldolgozás részén történő beleszámolásával. Én ennél a mérésnél az adatok után feldolgozó programjába tettem bele ezt a funkciót.

A programommal meghatároztam egy olyan túllövési értéket, amivel, ha módosítom az értékeket akkor a mérési pontonkénti átlag közelebb lesz a valósághoz és ezáltal az összvalóságtól való eltérési átlag is alacsonyabb lesz.

- A tag 0 kompenzált átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.019625 méter.
- A tag 1 kompenzált átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.08875 méter.
- A tag 2 kompenzált átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.0416249 méter.
- Az eszközök átlagos kompenzált hibájának átlagolásával megkapjuk, hogy átlagosan nagyjából 0.04999 métert téved az eszköz.



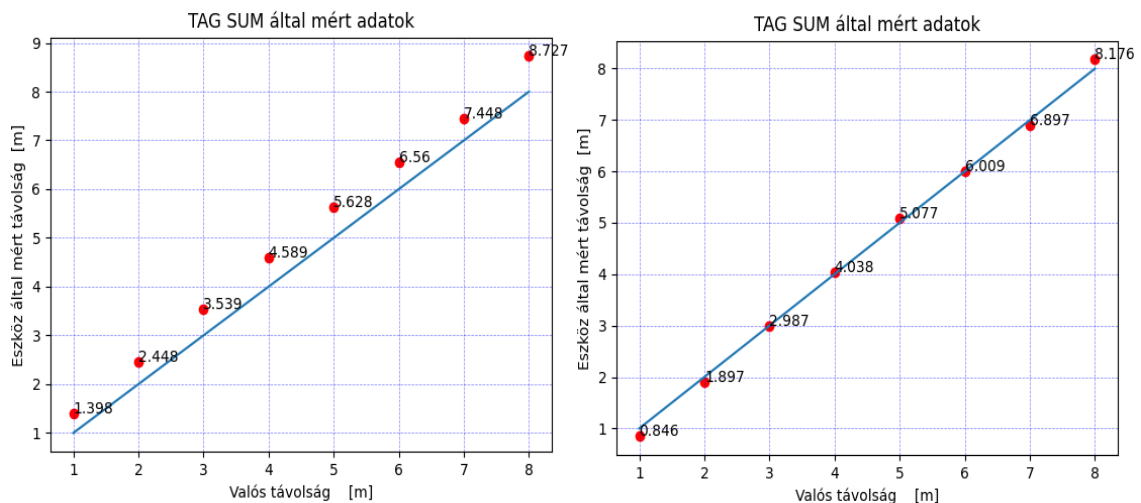
22. ábra Konfiguráció A kompenzációval ellátott mérési eredmények

A mellékjegyzékben feltüntetett, legenerált hisztogramok és azon ábrázolt gauss görbék (31. ábra Konfiguráció A tag_0 mérés hisztogramok, 32. ábra Konfiguráció A tag_1 mérés hisztogramok, 33. ábra Konfiguráció A tag_2 mérés hisztogramok) elemzése során észrevehető, hogy egy haranggörbe alak kirajzolódik minden mérés során. A vizsgált mérések ezáltal normál eloszlásúaknak tekinthetők.

A diagrammon feltüntetett *x tengely* a mért értékeknek a tengelye növekvő sorrendben. Az *y tengely* pedig azt mutatja, hogy az adott pontban hányszor fordul elő a mért érték, azoknak a darabszáma. A *x tengelyen* elhelyezkedő mérési pontokat nem tudtam beállítani, mert az általam használt matplotlib beállításai nem engedték ennek a lehetőségét. Ez annak köszönhető, hogy a felparaméterezés során két diagrammot csak akkor tud egy ábrán megjeleníteni, ha annak az *x* és *y* tengelyű dimenziói mind megegyeznek. Az esetenben ahhoz, hogy gauss görbét tudjak kirajzolni a hisztogramra, sokkal kisebb felbontásokat kellett megadnom *x tengely* mentén, mint ahány elemmel rendelkezett alaphoz a hisztogram *x tengelye*.

A mérési pontonként elemzett adatok során meghatároztam az adatoknak a szórását és megfigyelhető, hogy a távolság növekedésével nincs arányban a szórás növekedése. A szórás nagysága 0.141 és 0.292 között helyezkednek el.

Az eszközök összesített átlagának a valóságtól való eltéréseknek az átlagját a következő korrelációs diagrammokon látható (23. ábra) kompenzáció nélkül (bal oldalt) és kompenzációval ellátott (jobb oldalt).



23. ábra Konfiguráció A összesített eredmények

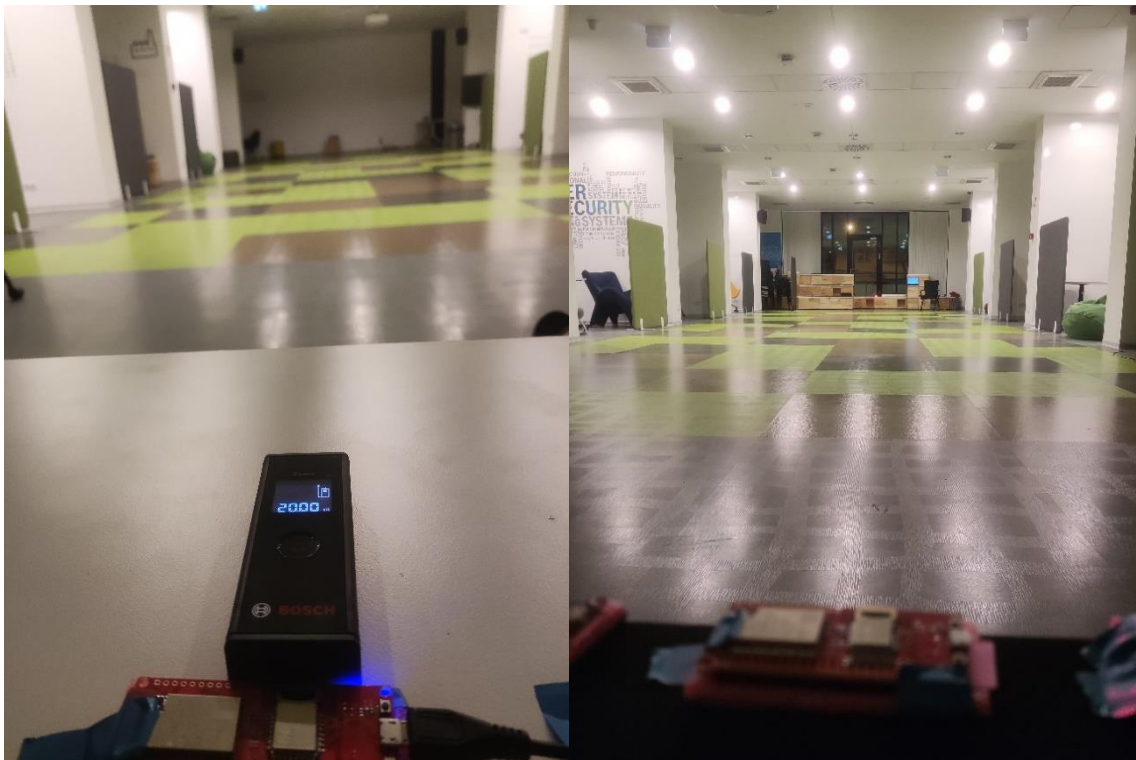
5.2.4. Konfiguráció B beállításai

Ennél a mérésnél az eszközkonfiguráció során én az üzemmódok közül a hosszú adathosszak, alacsonyabb frekvenciát és alacsony áramfogyasztásokat választottam ki. Ez az eszköz alap konfigurációs beállításának tekinthető egyik legelterjedtebb beállítás.

A Konfiguráció A beállításai esetén leírt adatmentéseket alkalmaztam ennél a mérésnél is. Ebben az esetben is egy USB kábelon keresztül kötöttem össze az eszközt és a gépet és ezen keresztül folytat az adatátvitel.

Ezeket a méréseket az előzővel ellentétben egy 20 méteres szakaszon ki tudtam mérni jelvesztés nélkül. A távolság megnövekedésével ellentétesen a mérési gyakoriságok számát csökkentettem. Ebben a kivitelezésben mindösszesen csak két-méterenként felvett pontokon mértem le az eszközöket. Ennek az oka az, hogy exponenciálisan növekszik a mérésre fordítandó idő a mérési pontok számának növekedésével és az általam vizsgált alátámasztások nem igényelnek nagyobb felbontást.

A 20 méteres szakaszt a képen látható (24. ábra) módon rendeztem be. Az ekkora mérési szakaszok miatt is lett kiválasztva ez a helyszín. A bútorok elhelyezése a helyszín kialakítása során nagy módosításokat követeltek. Minden mérés a szakasz hosszának függvényében egy tereprendezéssel kezdődik.



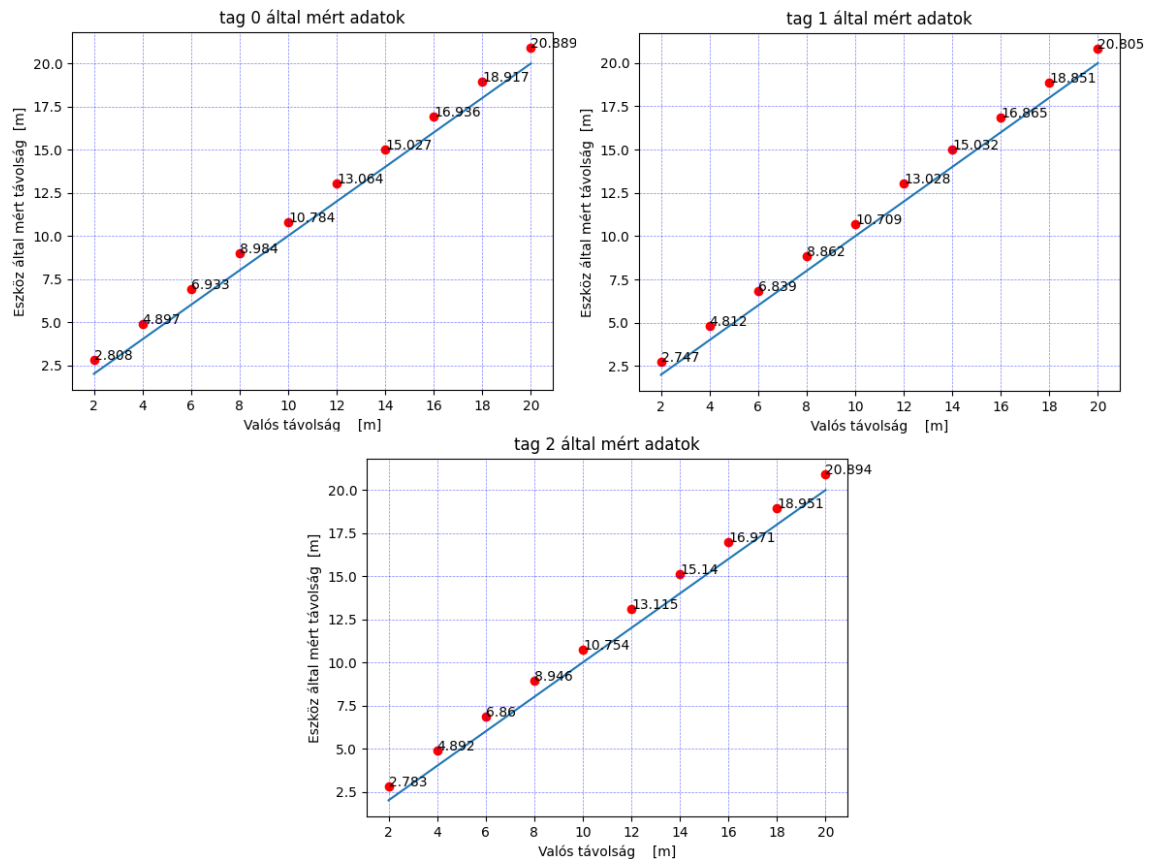
24. ábra Konfiguráció B mérés felállítása

5.2.5. Konfiguráció B mérések eredményei

A Konfiguráció A mérések eredményei elemzési formáit követve ennél a fejezetnél a mérési eredményeket írom le és azokat részletezem. (25. ábra, 26. ábra, 27. ábra)

- A tag 0 kompenzáció nélküli átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.9239méter.
- A tag 1 kompenzáció nélküli átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.8549méter.
- A tag 2 kompenzáció nélküli átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.93059 méter.
- Az eszközök átlagos kompenzáció nélküli hibájának átlagolásával megkapjuk, hogy átlagosan nagyjából 0.90316 métert téved az eszköz.

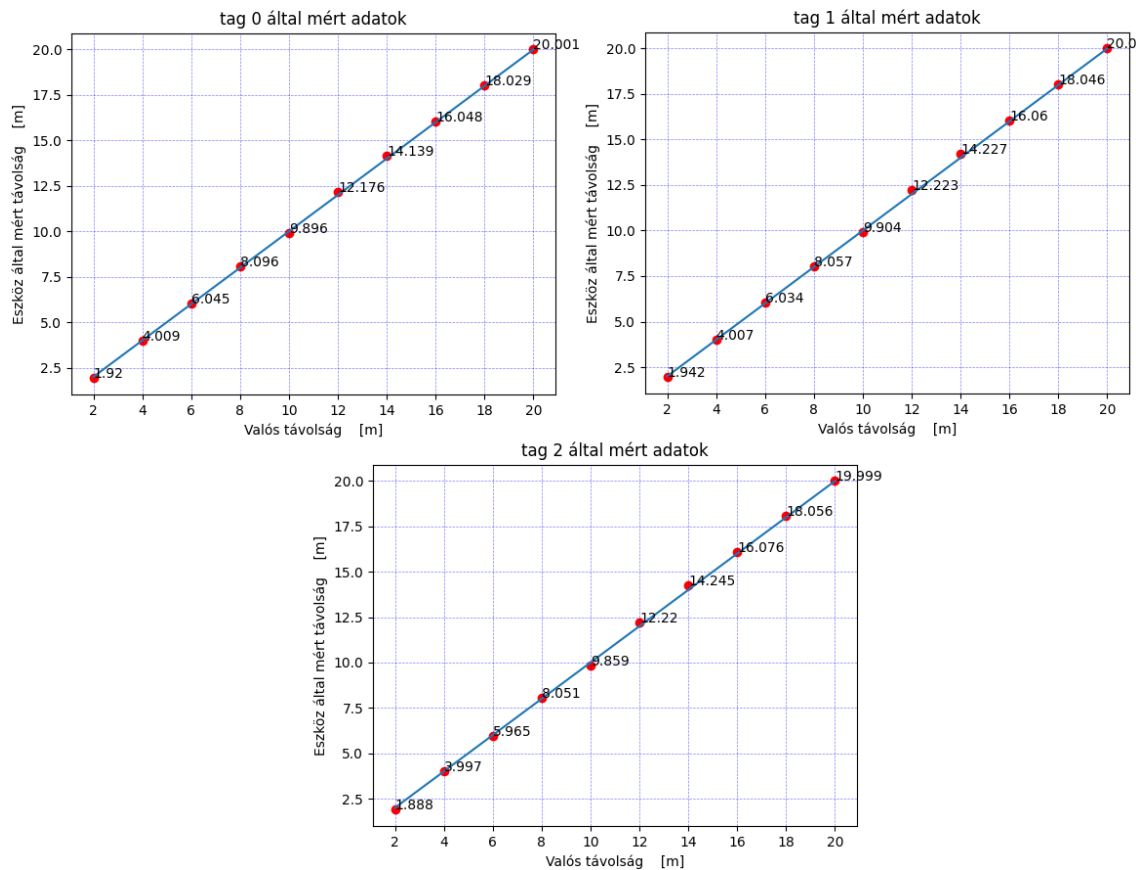
A méréseket követően az ábrán (25. ábra) is valamelyest látható, hogy a hibák átlaga nagyjából 0.9 méter környékén vannak. Ez mind az előző mérésnél is ugyan úgy az antenna késleltetésének kalibrációs problémájából is adódik.



25. ábra Konfiguráció B kompenzáció nélküli eltérések

A mérések befejezése után az adatok korrekcióit az után feldolgozó programom segítségével végeztem el az előzőhöz hasonlóan. Ezeket korrelációs diagrammon megjelenítem (26. ábra).

- A tag 0 kompenzált átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.019625 méter.
- A tag 1 kompenzált átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.08875 méter.
- A tag 2 kompenzált átlagos mérési hibája megközelítőleg 0.0416249 méter.
- Az eszközök átlagos kompenzált hibájának átlagolásával megkapjuk, hogy átlagosan nagyjából 0.07999 métert téved az eszköz.



26. ábra Konfiguráció B kompenzációval ellátott mérési eredmények

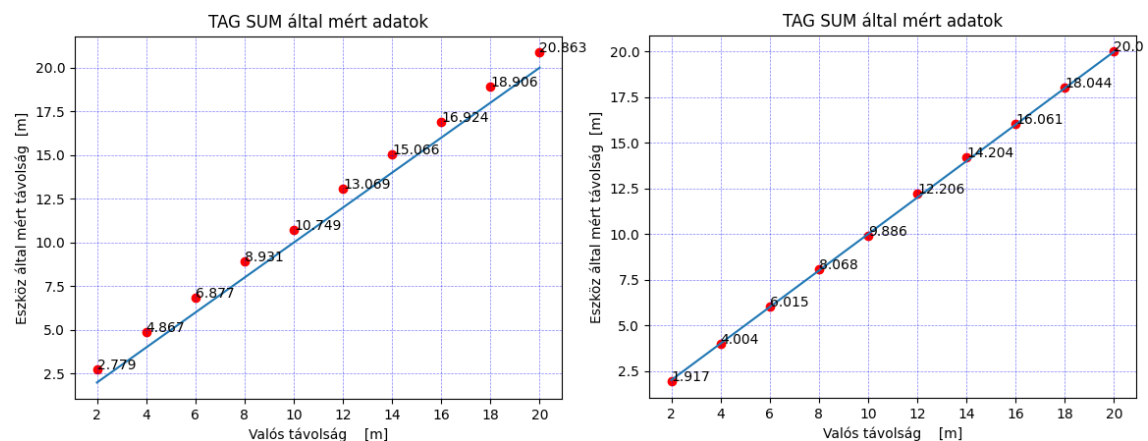
Ennél a konfigurációs beállításknál az eredeti 90.31 cm-es tévedést sikerült átlagosan nagyjából 5 cm-es hibára lecsökkentenem. A gyártó az eszközénél 10 cm-es hibahatárt határozott meg ennél fogva ez az 5 cm-es, általam adat után korrekcióval kapott eredmény egy nagyobb fejlődést jelent.

A mellékletben ennek a mérésnek a mérési pontonkénti adatai részletezett diagrammokkal ellátva megtalálhatók (39. ábra Konfiguráció B tag_2 mérés hisztogramok, 37. ábra Konfiguráció B tag_1 mérés hisztogramok, 34. ábra Konfiguráció B tag_0 mérés hisztogramok).

Ez a mérés egy hosszabb távon történt és itt is megállapítható, hogy a távolság növekedésével nem arányos a szórásnak a változása.

Vannak diagrammok, ahol van egy elnyújtott, lapos szakasz és utána van csak a haranggörbe. Ezeknél a diagrammoknál ez a jelenség abból fakad, hogy a lapos oldal részén van egy nagyon eltérő adat, amit mért az eszköz. Az ilyenféle diagrammok alapján könnyedén észrevehető, hogy az eszközben időközönként fellép egy ilyen hiba és ezt ki kell szűrni. Ezekre is jók ezek az elemzések, hogy fejleszteni lehessen a pontosságokat következtetések által.

Az eszközök összesített átlagának a valóságtól való eltéréseknek az átlagját a következő korrelációs diagrammokon látható (27. ábra) kompenzáció nélkül (bal oldalt) és kompenzációval ellátott (jobb oldalt).



27. ábra Konfiguráció B összesített eredmények

Ezalapján a két mérés alapján lehet következtetni arra, hogy elsősorban az eszközön belül beállított üzemmód használata nagyban befolyásolja a végeredmény kimenetelét. Érdekes ez alapján megkeresni a felhasználás szempontjából legideálisabb távolság / pontosság arányú konfigurációt.

6. RENDSZER MEGVALÓSÍTÁS

Egy beltéri helymeghatározó rendszerhez több komponens is szükséges. Az egyik legfontosabb ilyen eleme jelen esetben természetesen maga az UWB készülék. A különböző kalibrációs lehetőségei el lehet végezni akár az eszközön vagy utólagosan különböző algoritmusokkal fel lehet után dolgozni. Az után feldolgozás ideje és erőforrás igénye a megírt algoritmusnak az optimalizáltságától és az eszközök mennyiségétől függ. Ezekon kívül kell egy olyan program, ami meg tudja mutatni a kijelzőn, hogy hol is van az eszköz, aminek a hely elmozdulását követjük.

6.1. Virtuális iker megalkotása

Az általam használt helyszínen biztosítottak számomra tervrajzot a területről (28. ábra). Első körben megvizsgáltam eleinte mérőszalaggal majd később a lézeres távolságmérőmmel, hogy a tervrajzon feltüntetett adatok mennyire korrelálnak a valósággal.



28. ábra Kandó Kálmán kollégium tervrajz

A helyszínen tett pár mérés után kiderült, hogy a tervrajzon feltüntetett adatok nem egyeznek meg a valósággal. Ez azt jelenti, hogy az egyes falak közti távolság esetén a tervrajz és a valóság között a pár centitől egészen a 4-5 centiig terjednek az eltérések.

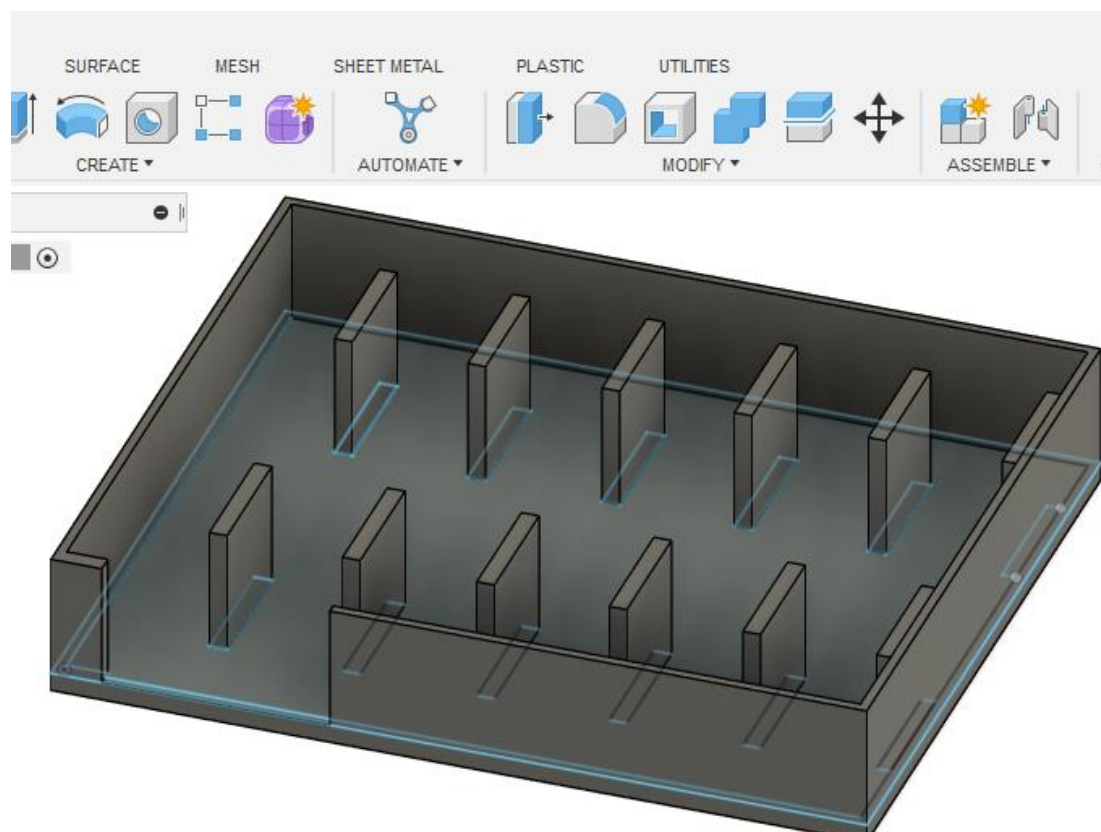
Az ilyen jellegű hibákat egy ilyen rendszer felállítása előtt ki kell küszöbölni. Én úgy oldottam meg, ami szerintem javasolt megoldás egy ilyen esetben, hogy a helyszínen lévő távolság adatokat használtam fel a háromdimenziós belső tér modellnek a megalkotásához.

A háromdimenziós modell megalkotásához használhattam volna a későbbiekben említésre kerülő grafikai programba épített modellező funkcióját is, de az ilyen típusú grafikai programok általában nem felhasználóbarátok modellezések tekintetében és nem elég pontosak a modellezésekhez.

A virtuális megjelenítésem pipeline első ilyen eleme a Fusion360. A Fusion360 egy professzionális modellező program, ami ingyenesen elérhető, gyorsan megtanulható és korábbiakban már tapasztalatot is szereztem belőle. Ebben vagy egy ilyen jellegű programban érdemes elkészíteni a modellünket azért is, mert ezt később a grafikai programok által támogatott kiterjesztésektől függően be lehet importálni és egy környezetváltás esetén is a modellünk megmarad.

Az alábbiakban az általam első ilyen modell lesz látható a helyszínről (29. ábra).

A dolgozatom lényegéből adódóan nem igényli azt, hogy esztétikai szempontoknak is megfeleljen. Természetesen egy ilyen modellt mindig tovább lehet alakítani, hogy valósághűbb legyen, például a helyszínen elhelyezett bútorok, különböző elemek megjelenítésével. Ez a valós felhasználás esetén lehet fontos a felhasználó részéről, de a dolgozatom nem terjed ki egy pontos virtuális iker modell elkészítésére, mindösszesen csak a mérések elvégzéséhez és reprezentálásához szükséges modellt tartalmazza.

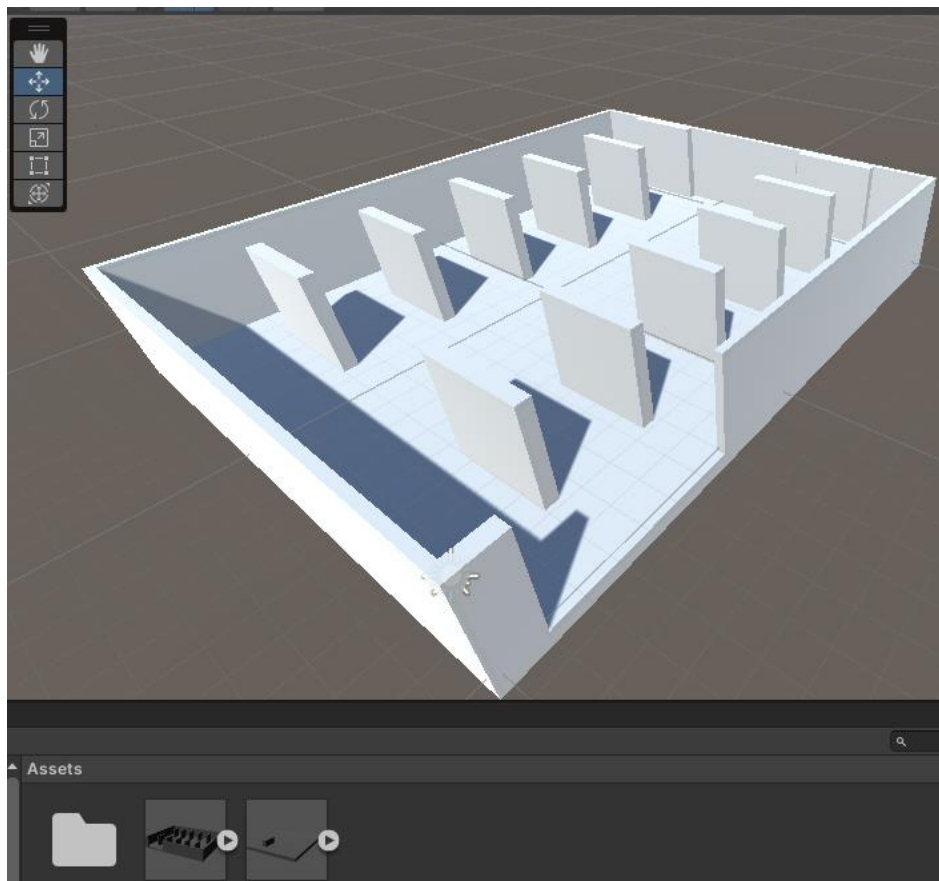


29. ábra Fusion360 beltér modell

6.2. Megjelenítő grafikai program

Grafikai motorral ellátott, ingyenes programválasztás esetén mindenképpen egy olyan programot szerettem volna választani, amiben van vagy tapasztalatom, vagy a programozási nyelve számomra ismerős és előnyt jelent, hogy ha már más is használta és tesztelni tudta sikeresen vagy egy teljes működő rendszert meg tudott vele valósítani.

A három főbb ilyen program, amivel találkoztam az irodalomkutatásom és a gyakorlati megvalósítási példákon keresztül, továbbá az általam felállított követelményeknek is megfelel, az a Unity, Unreal és ROS. Ezek közül én a Unity-t választottam. Ennek az oka az, hogy az általam választott modellező programban lehet olyan háromdimenziós fájlformátumot választani, amit a Unity felismer (30. ábra). Ezen kívül C# alapú a programozási nyelve és a felhasználói közösség sok kiegészítő eszközt fejlesztett és tett elérhetővé a Unity megjelenése óta. Ez az egyik legelterjedtebb és legmodernebb program, ami ingyenesen felhasználható is mindenki számára, adott kereteken belül.



30. ábra Beltér modell Unity-ben

7. TOVÁBBI FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A jövőbeli továbbfejlesztési lehetőség közé tartozik az újabb, korszerűbb eszközöknek a használata. Az újabb technológiájú eszközök számos előnnyel rendelkeznek, mint például százalékosan nagyobb pontossággal üzemelnek és több eszközzel kompatibilisek, köztük mobileszközökbe épített modulokkal is.

Emellett még az antennának a kalibrációját és a különböző antenna opciók megvizsgálását is fejlesztési lehetőségnek tekintem. Vannak olyan lapkára integrált antennák, amik például 70-80 méter távolság helyett 110-120 méter maximális távolságig képesek kommunikálni a többi készülékkel. Külön pcb lapka fejlesztése és hozzá antennák keresése és finomhangolása.

Érdemes lenne a mérések technikáját továbbfejleszteni a feldolgozó programmal együtt, a feldolgozó program szélesebb körű felparaméterezhetősége és több, aktuális mérésre illeszkedő matematikai, elemzési modellnek a használata szempontjából. Az általam egyik legideálisabbnak elképzelt metodika olyan eszközök használatának bevonását jelentené, ami pontosítaná az adatok validálását és felgyorsítaná a mérésekkel töltött időt is. Az általam mérték időhossza eltérőek, annak függvényében változtak, hogy hány eszközt mértem, hány pontban és hány adatra volt szükségem az elemzésemhez. Minden pontot manuálisan mértem ki és többször ellenőriztem, hogy biztosan jó-e a távolság az eszközök között. Ezt a folyamatot le lehetne váltani egy sínrendszer kialakításával, amin csúszka szerűen mozgatni lehetne az elemeket és csak egyszer igényelné a távolságok kimérését. Ezen a sínrendszeren ki lehetne alakítani fix mérési pontokat, ahol megállnak az eszközök, így nem minden mérés során kellene újra felvenni ezeket a pontokat.

A sínrendszert meglehetne támogatni egy olyan rendszerrel, ahol nem bízunk csak a kialakított megállópontokban, hanem egy lézeres távolságmérőt is bevonunk mellé. Ebben az esetben célszerű lenne, ha a távolságmérő rendelkezne egy olyan USB kimenettel, ahonnan historikusan lementhetőek lennének az adatok. Abban az esetben, ha rendelkezésre áll egy ilyen eszköz és az UWB modulok kimenetét is historikusan kérjük le, akkor a kész rendszer pontosságának megbecslésére is alkalmas lenne. Egy ilyen eszközállománnyal nem csak statikus, pontbéli méréseket lehetne validálni, hanem valós idejű, dinamikus, mozgásban lévő eszközöknek a detektálási pontosságát is mérni lehetne. Ennek a mérésnek egy esetleges másik lehetősége egy mobilrobotra felszerelni az UWB címkét és a kalibrált mobilrobot adatai alapján vizsgálni a kapott eredményeket. Ezekre a változtatásokra azért lenne szükség, mert így az egész rendszernek a pontosságát is meg lehetne becsülni nem pedig csak az egyes elemekét. Természetesen ebben az esetben nagy függőség állna elő a mobilrobot és/vagy az eszközök időbeli összeszinkronizálásának pontosságával.

A jövőben a túllövések kikompenzálásában, az adatok eltérésében lévő minták észrevételében és ezeknek a korrigálásában fel lehetne használni egy mesterséges intelligenciát. Napjainkban, 2022-ben javában elkezdett elterjedni a mesterséges intelligenciának a felhasználása és természetesen ebben az esetben is hozhat javításokat,

amiket vagy nem vettek még észre az egyes kutatócsoportok, vagy nem írtak még olyan algoritmust a bonyolultságából, időigényéből vagy egyéb dologból fakadóan, ami pontosítaná ezeket az eredményeket.

A TDK dolgozatom legvégére kialakítottam már egy bevált módszert a belső térnek a virtuális lemásolásához. Jövőbeli tervként szerepel egy olyan program megírása ebben a virtuális másolatot megjelenítő programban, ahol elhelyezhetem a horgonyokat 1:1 arányban és hozzáírhatnék egy programot, ami meg is jeleníti a címkét. A kód elsősorban egy síkbeli, 2D-s megjelenítést tesz lehetővé, később pedig minden eddig a pontig eljutott munkának a konklúzióját levonva egy 3D-s, valós idejű megjelenítésre alkalmas kódot lehet megírni. Számomra a legfontosabb paraméterei a minél pontosabb helyzetmeghatározás lenne és a frissítési ráta másodpercenként legalább 30 legyen. Ebben az esetben felmerülne szenzorfüzióknak a használata, de mivel a címke, aminek a helyzetét meg szeretném határozni és megjeleníteni egy telefon lenne ezért a szenzorfüzió egyszerűen megoldható. Ez abból adódik, hogy minden okostelefon rendelkezik sok beépített szenzorral például gyorsulásmérővel, giroszkóppal és sok egyéb modullal, aminek az adatait ki lehet gyűjteni és ugyanúgy tovább lehetne adni.

8. ÖSSZEFOGLALÓ

A TDK dolgozatom során megvizsgáltam minél több témába illő technológiai megvalósítási lehetőséget. Ezeknek a technológiáknak összegyűjtöttem egy alap működési leírásukat és/vagy egy rövid háttérleírásukat. Az irodalomkutatásom fő részének tartom az adott technológiák előnyeinek, illetve hátrányainak a kielemezését és kiemelését. Ezáltal mindenki számára könnyebben értelmezhetővé téve, hogy melyik mire képes, mik a korlátai és ezek alapján miért azt az egy adott technológiát választottam TDK dolgozatom kutatási céljának.

Röviden összefoglaltam az irodalomkutatásomban az egyes mérési környezetekhez tartozó elemzési modelleket és az általánosabb statisztikai elemzési módszereket is, amelyekből kiválasztottam a kutatásom során alátámasztani kívánt eredmények kiszámításához és elemzésemhez szükséges módszereket.

A mérések megkezdése előtt meghatároztam mérési követelményeket. Fontos volt mellette egy mérési metodikának a megalkotása is a megfelelő rendszertervvel, aminek a sémája mentén képes voltam elvégezni és kiértékelni a méréseket. Az általam kidolgozott követelményeket és metodikát az egyes részekben részletezve leírtam és kifejtettem az ezen részek mögött álló gondolatmenetemet. Miért úgy alakítottam ki az adott részeket és mire kellett figyelnem, miért ezt a megoldást találtam a kutatásom számára a legideálisabbnak. Ezáltal nyomon követhetővé téve a megvalósításomat mások számára és a mérések reprodukálásának vagy metodikájának továbbfejlesztéséhez utat biztosítva.

A dolgozatom fő része az elvégzett mérések és azoknak az adatainak a kielemezése. A kielemezett adatok és további irodalomkutatás alapján az eszközök különálló pontosságát képes voltam megbecsülni és továbbfejleszteni annak érdekében, hogy a kész rendszer összpontosságát is növeljem ezáltal.

Sikerült elérnem, hogy a különböző eszközbeállítások pontosságát egy általam írt program segítségével meg tudjam határozni és fel tudjam javítani. A folyamat ezen része teljes mértékben automatizálásra került és a programom felhasználója számára biztosít olyan adatokat, amiket másfajta elemzések, kimutatások során is fel tud használni.

A dolgozatom legnagyobb eredményeként szolgál olyan adatokban észlelt módszertani eltérések vizsgálata, amiket felhasználva tudtam írni egy programot, ami a készülék pontosságát a gyártó által biztosított 10 cm-ről közel 5 cm-re csökkentti le.

9. SUMMARY

During my thesis, I investigated as many technological implementation options as possible. For these technologies I collected a basic functional description and/or a short background description. I consider the main part of my literature search to be the analysis and highlighting of the advantages and disadvantages of the respective technologies. This will make it easier for everyone to understand what each technology can do, what its limitations are and why I have chosen that particular technology as the research objective of my thesis.

I have also briefly summarised the analytical models associated with each measurement environment in my literature search and the more general statistical analysis methods from which I have selected the methods I need to calculate and analyse the results I want to support in my research.

Before starting the measurements, I defined the measurement requirements. It was also important to create a measurement methodology with a suitable system design, along the lines of which I was able to carry out and evaluate the measurements. I have described the requirements and methodology I have developed in detail in each section and explained the thinking behind these sections. Why I designed the sections and what I had to look out for, and why I found this the most ideal solution for my research. In this way, I can make my implementation traceable for others and provide a way forward for further development of the reproduction of measurements or methodology.

The main part of my thesis is an analysis of the measurements and the data. Based on the analysed data and further literature search, I was able to estimate and improve the individual accuracy of the instruments in order to increase the overall accuracy of the final system.

I was able to determine and improve the accuracy of the different device settings using a program I wrote. This part of the process is fully automated and provides the user of my program with data that can be used for other types of analysis and reporting.

The greatest achievement of my thesis is the examination of methodological deviations in the data that I was able to use to write a program that reduces the accuracy of the instrument from the 10 cm provided by the manufacturer to nearly 5 cm.

10. JEGYZÉKEK

10.1. Irodalomjegyzék

- [1] National Geographic, (<https://www.nationalgeographic.org/photo/triangulation-sized/>), utoljára megtekintve: 2022.04.10.
- [2] K. Zak, N. Mohammed és K. Joe: SpaceX satellite signals used like GPS to pinpoint location on Earth, (<https://news.osu.edu/spacex-satellite-signals-used-like-gps-to-pinpoint-location-on-earth/>), utoljára megtekintve: 2022.03.30..
- [3] B. Li, T. Gallagher, A. G. Dempster, C. Rizos: How feasible is the use of magnetic field alone for indoor positioning?, IEEE Xplore, 2013, ISBN 978-1-4673-1954-6
- [4] B. Proctor: The Ins and Out of An Indoor Positioning System, (<https://www.link-labs.com/blog/indoor-positioning-system>), utoljára megtekintve: 2022.04.08.
- [5] Inpixon: Bluetooth Location Tracking & Positioning, (<https://www.inpixon.com/technology/standards/bluetooth-low-energy>), utoljára megtekintve: 2022.04.08.
- [6] Satish R.Jondhale, Rajkumar S.Deshpande: GRNN and KF framework based real time target tracking using PSOC BLE and smartphone, *Ad Hoc Networks*, Vol. 84, 2019, pp. 16-28.
- [7] Autoriteit Persoonsgegevens: WiFi tracking technology in shops and on public roads by Bluetrace, (https://autoriteitpersoonsgegevens.nl/sites/default/files/atoms/files/conclusions_bluetrace_investigation.pdf), utoljára megtekintve: 2022.04.23.
- [8] P. Digvijay: Massive MIMO: A boost for Next Gen 5G wireless Communication, (<https://www.dolcera.com/web/blog/massive-mimo-a-boost-for-next-gen-5g-wireless-communication/>), utoljára megtekintve: 2022.04.19.
- [9] S. Hossein, A. Cigdem, H. Dorian, W. Thomas és S. Harald: 3D Indoor Localization using 5G-based Particle Filtering and CAD Plans, IEEE Xplore, 2022, ISSN: 2471-917X
- [10] Z. Lukasz, S. Tom, H. Marlene és Z. Thomas: UWB Localization System for Indoor Applications: Concept, Realization and Analysis, *Journal of Electrical and Computer Engineering*, ISSN: 2090-0147
- [11] QCOMResearch: 5G: Bringing precise positioning to the connected intelligent edge, (<https://www.qualcomm.com/news/onq/2021/12/5g-bringing-precise-positioning-connected-intelligent-edge>), utoljára megtekintve: 2022.04.15.
- [12] Giorgio Zanella: Global UWB Market Shipment to Reach 317 Million Units in 2022, (<https://www.eetasia.com/global-uwb-market-shipment-to-reach-317-million-units-in-2022/>). utoljára megtekintve: 2022.11.08.
- [13] P. Tommaso, S. Simon, M. Michele: Performance Comparison between Decawave DW1000 and DW3000 in low-power double side ranging applications, IEEE Xplore, 2022 , ISBN: 978-1-6654-0981-0
- [14] ESPRESSIF: ESP32-WROVER-B & ESP32-WROVER-IB, (https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wrover-b_datasheet_en.pdf), utoljára megtekintve: 2022.11.08.
- [15] Bosch DIY: Szerszámok otthonra és a kertbe, (<https://www.bosch-diy.com/hu/hu/p/zamo-0603672700-v46416>). utoljára megtekintve:

2022.08.11.

- [16] Favendo: Asset Tracking by Favendo. Track and Trace anything, (<https://www.favendo.com/asset-tracking>), utoljára megtekintve: 2022.04.19.
- [17] V.Redkin: How are you there «in the matrix»? Identify location without GPS, (<https://www.loccate.com/blog/identify-location-without-gps/>), utoljára megtekintve: 2022.04.10.
- [18] NI: 5G Massive MIMO Testbed: From Theory to Reality, (<https://www.ni.com/hu-hu/innovations/white-papers/14/5g-massive-mimo-testbed--from-theory-to-reality--.html>), utoljára megtekintve: 2022.04.19.
- [19] pSemi: Complete 5G mmWave Front End Solutions, (<https://www.psemi.com/technology/mmwave>), utoljára megtekintve: 2022.04.24.
- [20] A. Solin, M. Kok, N. Wahlström, T. B. Schön és S. Särkkä: Modeling and Interpolation of the Ambient Magnetic Field by Gaussian Processes, (<https://arxiv.org/pdf/1509.04634.pdf>), utoljára megtekintve: 2022.04.10.
- [21] A. E. Kianfar, F. Uth, R. Baltes és E. Clausen: Development of a Robust Ultra-Wideband Module for Underground Positioning and Collision Avoidance, *Springern*, Vol. 37, 2020, p. 1821–1825.
- [22] C. Yun és Z. Taoyun, „UWB Indoor Positioning Algorithm Based on TDOA Technology, *IEEE Xplore*, 2019, ISBN: 978-1-7281-3918-0.

10.2. Táblázatjegyzék

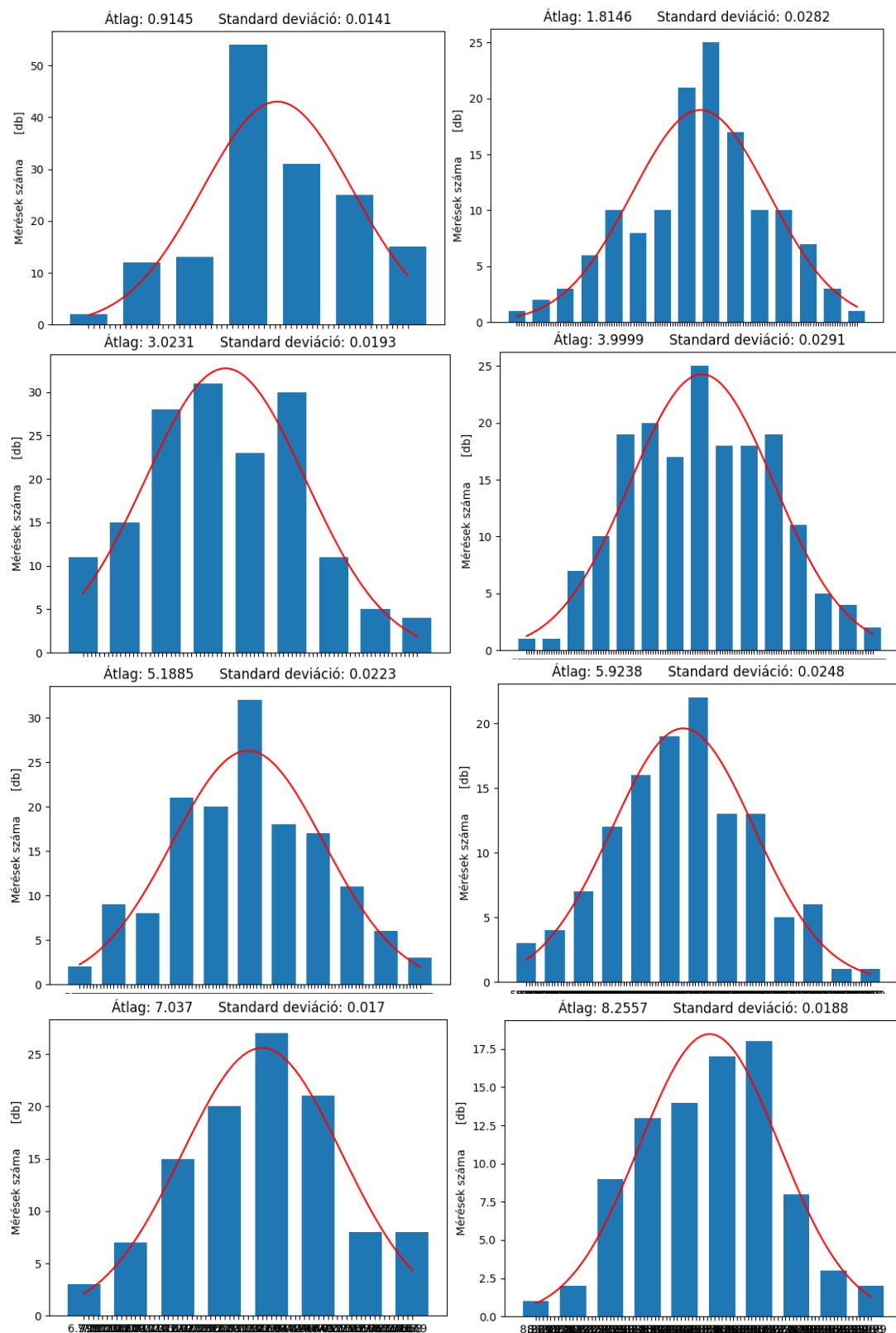
2.7.1. táblázat Technológiák összehasonlítása.....	19
4.2.1. táblázat DW1000 specifikáció	26
4.2.2. táblázat ESP32-WROVER-B specifikáció	26
4.2.3. táblázat Bosch Zamo specifikáció	27

10.3. Ábrajegyzék

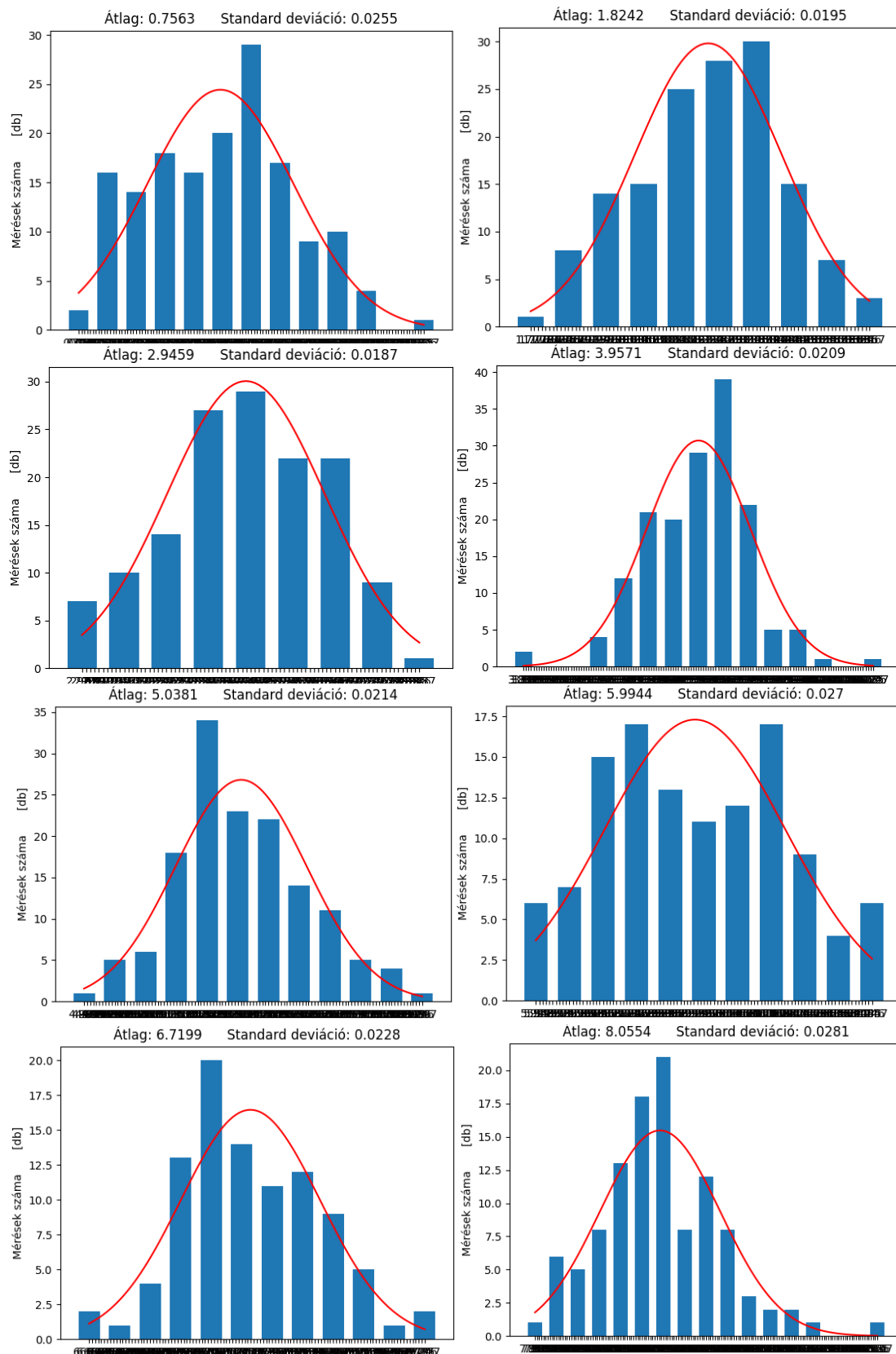
1. ábra A földgömb illusztrációja három műholddal, amelyek egy pontos helyet háromszögelnek [1].....	5
2. ábra Mobil háromszögelési séma [17]	6
3. ábra Vektor mező komponens [20].....	7
4. ábra Végso interpolált magnitúdóterkép [20]	8
5. ábra Eszközkövetés [16]	9
6. ábra A kifejlesztett GRNN architektúra a javasolt célkövető algoritmusokhoz. [6]...	10
7. ábra 5G mmWave Integrált megoldások [19].....	14
8. ábra A többantennás technológia fejlődése a 4G MIMO-tól az 5G Massive MIMO-ig [18].....	15
9. ábra A TDoA algoritmus sematikus diagramja [22].....	17
10. ábra Érkezési szög (AoA) lokalizációs technika [21].....	18
11. ábra ESP32 UWB eszköz	26
12. ábra Bosch Zamo lézeres távolságmérő.....	27
13. ábra Eszközök mérési folyamatábrája vezetékes módon.....	28
14. ábra Soros port kimeneti log txt fájl	29
15. ábra Kandó Kálmán Kollégium Robert Bosch közösségi tér	31
16. ábra Mozgatható környezeti elemek	32
17. ábra Arduino IDE 2.....	33
18. ábra Adatok tárolása hierarchia példa.....	34
19. ábra Adatok tárolása hierarchia példa.....	34
20. ábra Konfiguráció A mérés felállítása	35
21. ábra Konfiguráció A kompenzáció nélküli eltérések.....	36
22. ábra Konfiguráció A kompenzációval ellátott mérési eredmények.....	37
23. ábra Konfiguráció A összesített eredmények	38
24. ábra Konfiguráció B mérés felállítása	39
25. ábra Konfiguráció B kompenzáció nélküli eltérések.....	40
26. ábra Konfiguráció B kompenzációval ellátott mérési eredmények	41
27. ábra Konfiguráció B összesített eredmények.....	42
28. ábra Kandó Kálmán kollégium tervrajz.....	43
29. ábra Fusion360 beltér modell	44
30. ábra Beltér modell Unity-ben	45
31. ábra Konfiguráció A tag_0 mérés hisztogramok	2
32. ábra Konfiguráció A tag_1 mérés hisztogramok	3
33. ábra Konfiguráció A tag_2 mérés hisztogramok	4
34. ábra Konfiguráció B tag_0 mérés hisztogramok	5
36. ábra Konfiguráció B tag_0 mérés hisztogramok	6
35. ábra Konfiguráció B tag_1 mérés hisztogramok	6
37. ábra Konfiguráció B tag_1 mérés hisztogramok	7
38. ábra Konfiguráció B tag_2 mérés hisztogramok	7

39. ábra Konfiguráció B tag_2 mérés hisztogramok	8
--	---

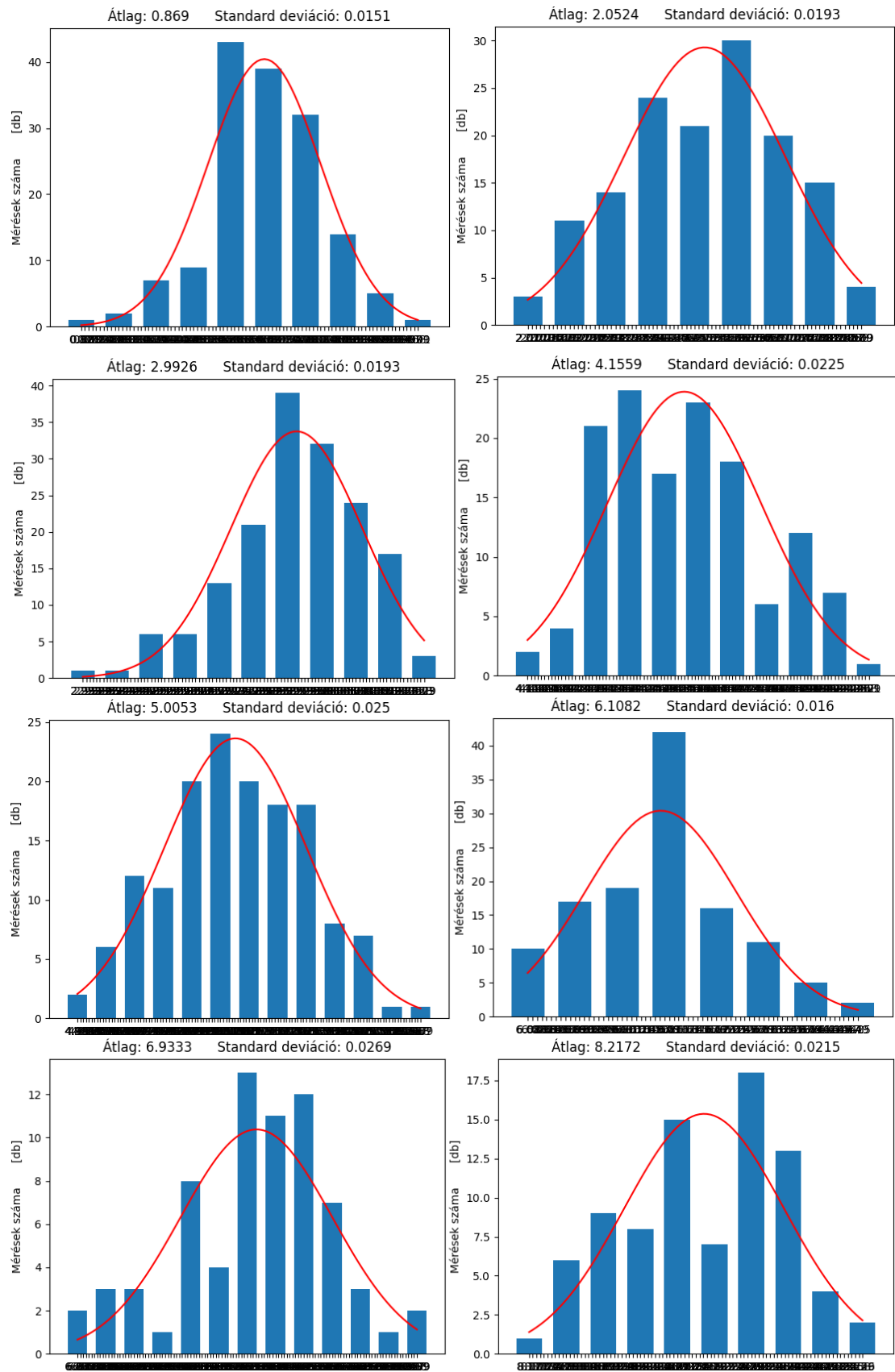
11. MELLÉKLETEK



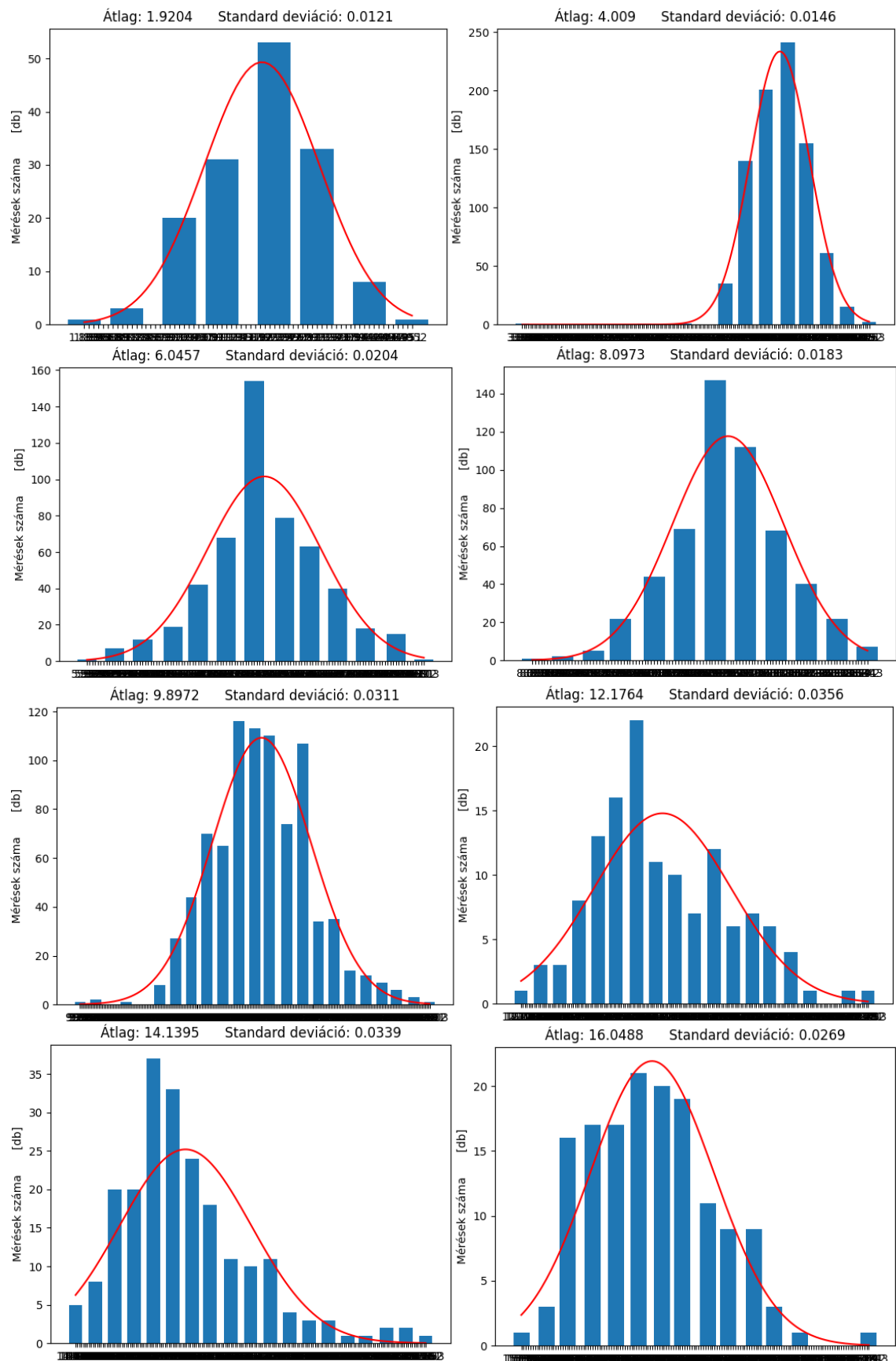
31. ábra Konfiguráció A tag_0 mérés hisztogramok



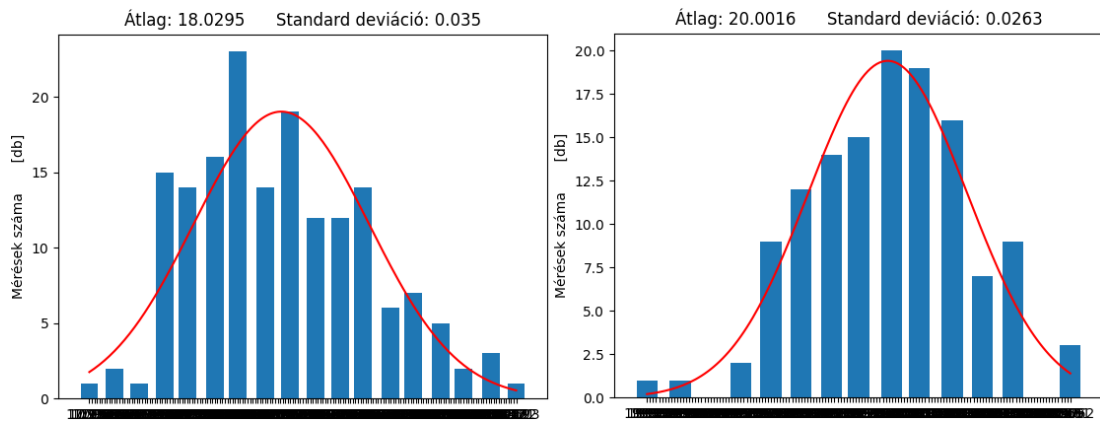
32. ábra Konfiguráció A tag_1 mérés hisztogramok



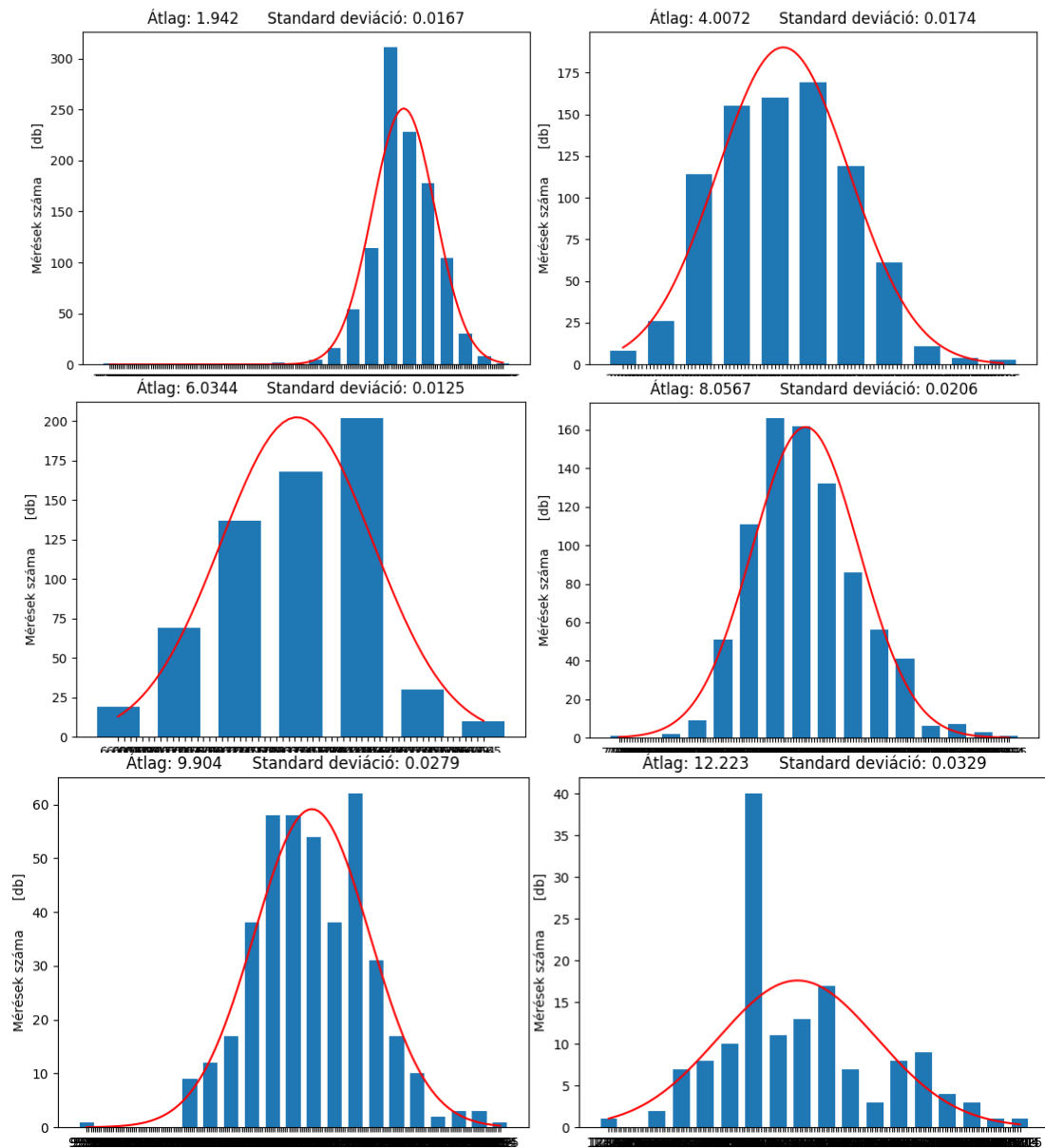
33. ábra Konfiguráció A tag_2 mérés hisztogramok



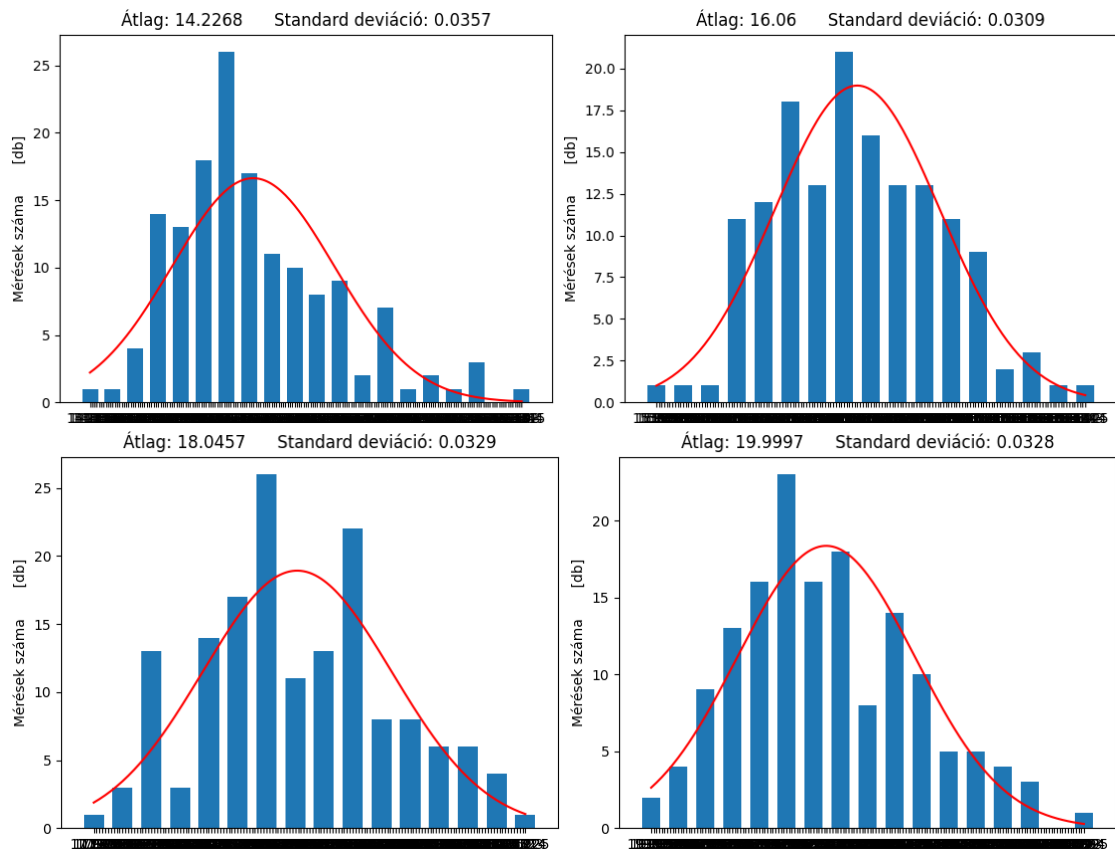
34. ábra Konfiguráció B tag_0 mérés hisztogramok



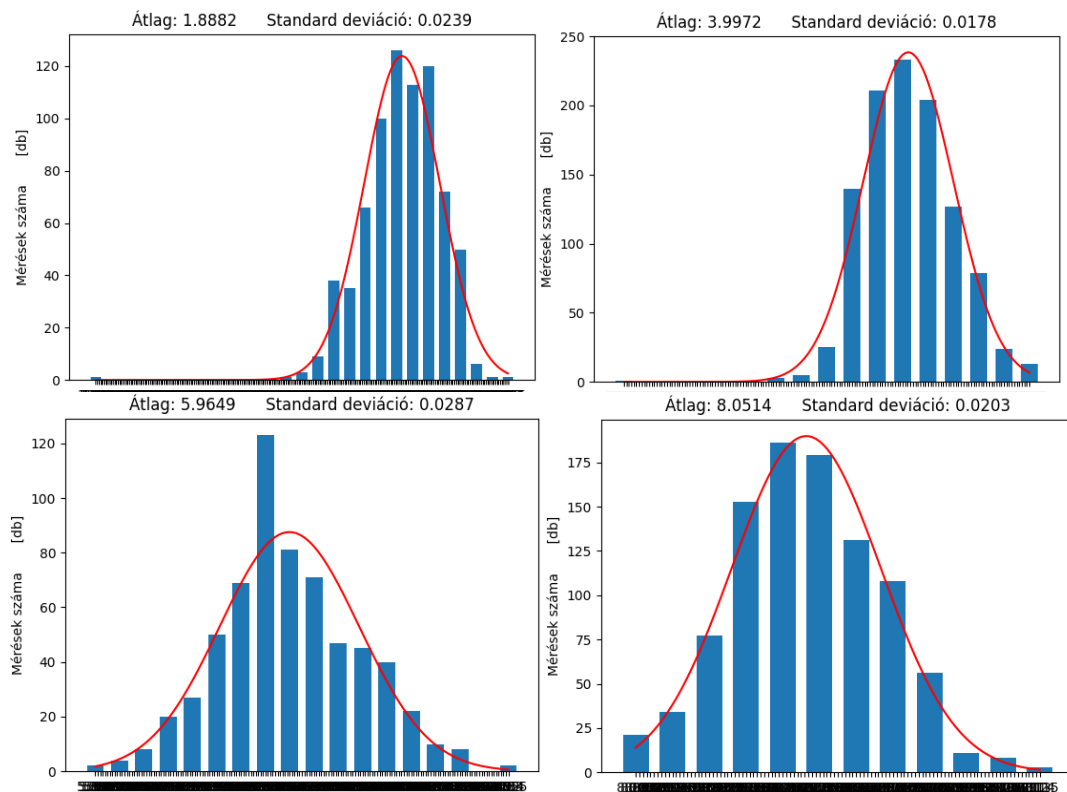
35. ábra Konfiguráció B tag_0 mérés hisztogramok



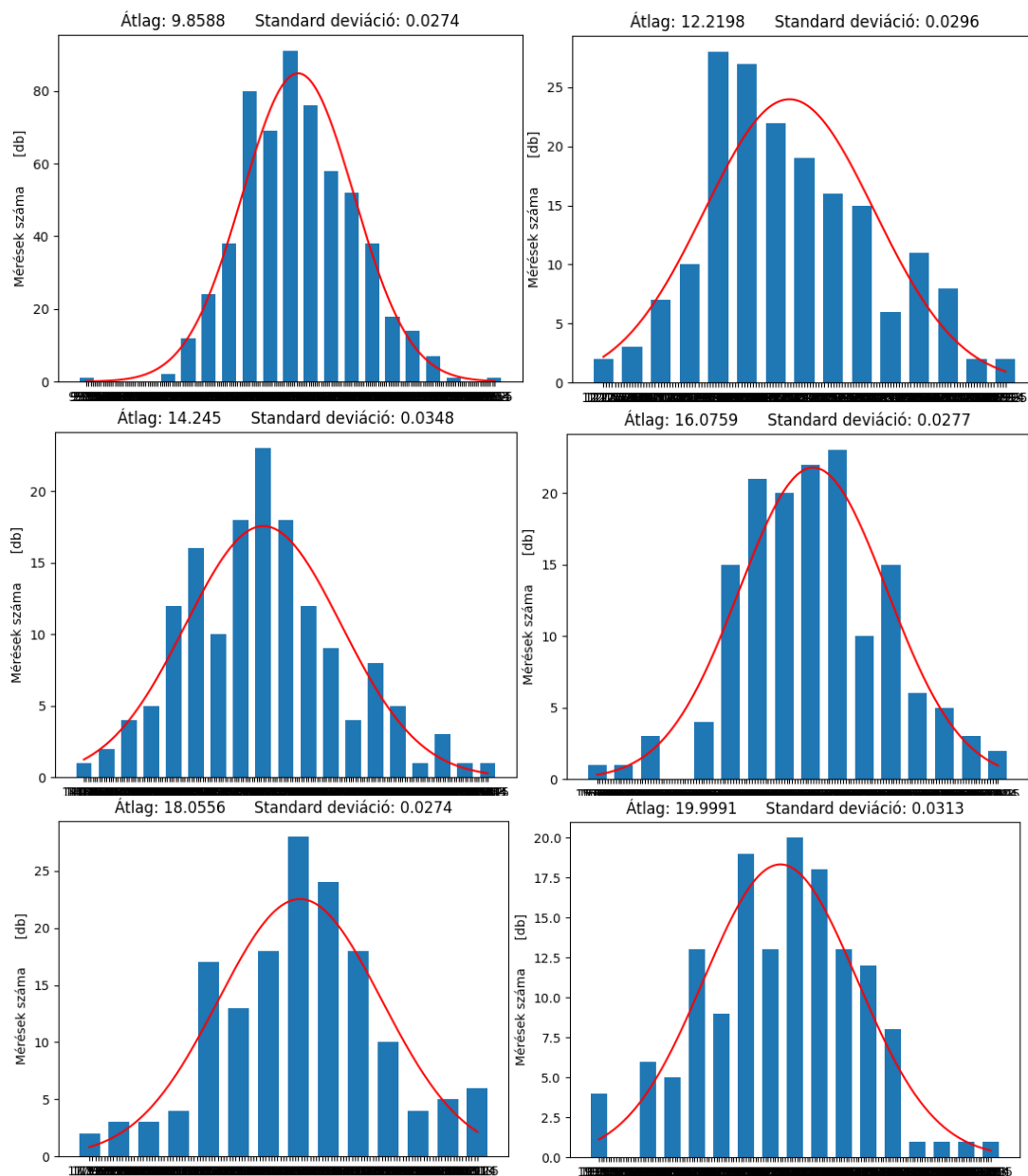
36. ábra Konfiguráció B tag_1 mérés hisztogramok



37. ábra Konfiguráció B tag_1 mérés hisztogramok



38. ábra Konfiguráció B tag_2 mérés hisztogramok



39. ábra Konfiguráció B tag_2 mérés hisztogramok