



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék

Wohlfart Richárd

**ÚJSZERŰ ÖKOLÓGIAI CÉLÚ
AUTOMATIZÁLT
RÁDIÓTELEMETRIÁS
NYOMKÖVETŐRENDSZER**

KONZULENS

Tóth Tibor, Dr. Kővári Bence

BUDAPEST, 2024

Tartalomjegyzék

Abstract	5
1 Bevezetés	6
1.1 A feladat bemutatása.....	6
1.2 Állatfajok védelme és kártevő monitorozás.....	6
2 Állatok rádiós nyomkövetése	8
2.1 Manuális állatmegfigyelési módszerek.....	8
2.2 A hagyományos rádiós nyomkövetés	8
2.3 Automatizált megoldások	9
2.3.1 GNSS alapú nyomkövetők	10
2.3.2 Location fingerprinting	11
2.3.3 Angle of Arrival (AoA) stationary.....	13
2.3.4 Time Difference of Arrival - TDoA.....	15
2.3.5 Globális elérésű rendszerek.....	16
3 A saját fejlesztésű automatizált nyomkövetőrendszer	17
3.1 A Rendszer működési elve.....	17
3.1.1 Rendszerkövetelmények.....	17
3.1.2 A rendszer felépítése és működése	18
3.1.3 Jeladók.....	19
3.1.4 A vevőtornyok felépítése és működése.....	20
3.2 A hardverkomponensek firmware programjai	21
3.2.1 A Jeladó firmware.....	21
3.2.2 A vevőkészülék komponenseinek és programjainak áttekintése.....	21
3.2.3 Központi digitális jelfeldolgozó	23
3.2.4 Tápegység, és rendszerállapot-monitorozó firmware	24
3.2.5 Központi vevőegység	24
3.3 A PC-s vezérlő-, adatgyűjtő-, adatfeldolgozószoftver komponensei	25
3.3.1 Hardvervezérlési funkciók	25
3.3.2 Kézi vezérlés.....	25
3.3.3 Automatizált vezérlés.....	26
3.3.4 Adatgyűjtés, naplózás	27
3.3.5 A rendszer állapotának monitorozása, adatvizualizáció	27

3.3.6 Távoli elérés biztosítása	29
3.3.7 Adatfeldolgozás	29
4 Új módszerek és azok szoftveres implementációja a mérőrendszer pontosságának növelésére.....	30
4.1 Jeladók ütemezése	30
4.2 Parallel feladatok futtatása a központi digitális jelfeldolgozó mikrokontrolleren	32
4.3 Alacsony memóriaigényű SMA szűrő tervezése.....	33
4.4 Csatornák közötti interferencia csökkentése	36
4.5 Mérési adatok tömörítése	38
4.6 Mérések kiértékelése a PC-s szoftverben.....	40
4.6.1 Jelek kiértékelése	41
4.6.2 Jelek szűrése	41
4.6.3 A szűrők működése.....	41
4.6.4 Iránybecslés	43
4.6.5 Pozícióbecslés.....	44
5 Eredmények bemutatása	45
5.1 Összehasonlítás az alternatív megoldásokkal	45
5.1.1 AoA rotating – ATLAS TDoA összehasonlítás	48
5.2 Visszajelzés	49
5.3 Tapasztalatok.....	49
5.4 Eredmények összegzése	51
6 Hivatkozások	53

Összefoglaló

A vadon élő veszélyeztetett állatfajok viselkedésének objektív méréseken alapuló szisztematikus megfigyelése alapvető szerepet tölt be a megismerésükben és védelmük megtervezésében. Tudományos vizsgálatok során kiemelt fontossággal bír az állatfajok élőhelyének és területhasználati sajátosságainak megismerése különféle nyomkövetési módszerek segítségével.

Jóllehet a vándorló és nagy területhasználatú fajok mozgásának követésére számos, alapvetően kielégítő paraméterekkel rendelkező műszaki megoldás létezik (mint például a Global Navigation Satellite System (GNSS) nyomkövetők, az Argos Wildlife Monitoring vagy a Geolokátoros adatgyűjtők), a kistestű, legfeljebb néhány négyzetkilométeres területet használó állatok (rágcsálók, hüllők, rovarok és bizonyos madárfajok) megfigyelésére eddig nem létezett olyan eszköz, amely az állatok számára még nem zavaró tömegű (0.15g – 4g) rádióadók alkalmazása mellett lehetővé tette volna az egyedek pozícióadatainak nagy pontosságú és sűrűségű meghatározását.

A saját fejlesztésű összetett hardverből és szoftverből álló automatizált rádiótelemetriás nyomkövető rendszerünk ezt a hiányt hivatott pótolni. Képes önállóan, egyidejűleg akár több tucat állat pozícióját méter alatti pontossággal (egy hektáros vizsgálati terület esetében), 1-2 perces időközönként meghatározni több hónapon keresztül. Dolgozatomban bemutatom azt az általam kidolgozott szoftverrendszert, mely lehetővé teszi ennek a nagy pontosságú, több rádiós iránymérő egységből álló komplex rendszernek az irányítását, beleértve a hardveren futó, digitális jelfeldolgozást végző firmware-t, valamint a PC-s vezérlő, adatgyűjtő és megjelenítő programot.

Az elkészült automatizált nyomkövető rendszert már több biológiai-ökológiai vizsgálat során alkalmazták. Így például sikeresen meg tudtuk figyelni a fokozottan védett északi pocok faj néhány populációjának kiválasztott egyedeit. Az eredmények több, eddig ismeretlen viselkedési jellemzőre hívták fel a kutatók figyelmét. Reményeim szerint a rendszer a jövőben sok más állatfaj megismerésében és védelmében fog segítséget nyújtani.

Abstract

Systematically observing the behaviour of endangered wild animal species through objective measurements is crucial for understanding them and formulating effective conservation strategies. In scientific studies, it is highly important to understand the habitat use and home range characteristics of animal species through various spatial tracking methods.

Although there are several technological solutions with generally satisfactory parameters for tracking the movements of migratory species and other animals with large home ranges (such as Global Navigation Satellite System (GNSS) trackers, Argos Wildlife Monitoring and Geolocator data loggers), no adequate device has existed for monitoring small animals that occupy areas of at most a few square kilometers (such as rodents, reptiles, insects, and certain bird species). These devices must utilize non-intrusive radio transmitters that weigh between 0.15g and 4g, while also providing high-precision and high-density positional tracking of the observed specimens.

Our self-developed automated radio telemetry tracking system, consisting of both hardware and software solutions, is intended to fill this gap. It can determine the positions of several dozen animals simultaneously with sub-meter accuracy (in the case of a one-hectare study area) at intervals of 1-2 minutes for several months depending on configuration. In my thesis, I present the software system I have researched and developed, which enables the control of this high-precision radio direction-finding system, consisting of multiple synchronized radio receiver units. This includes the firmware running on the hardware for digital signal processing, as well as the PC-based control, data collection, and visualization program.

The automated tracking system has already been used in several biological-ecological studies. For example, we successfully observed select individuals from some populations of the endangered *Microtus oeconomus* species. The results have revealed several previously unknown behavioural characteristics to researchers. I hope that in the future, this system will contribute to a better understanding and conservation of many other animal species.

1 Bevezetés

1.1 A feladat bemutatása

A TDK dolgozatom témája egy saját tervezésű kis és közepes területhasználatú állatfajok mozgásának és viselkedésének ökológiai célú megfigyelését szolgáló rádiótelemetriás automatizált nyomkövető rendszer vezérlő, adatfeldolgozó és -gyűjtő szoftvereivel és firmware-eivel kapcsolatos munkám és eredményeim bemutatása. A hardver fejlesztéséhez és teszteléséhez is hozzájárultam, amit velem együtt egy 3 fős fejlesztőcsoport végzett, de a dolgozatomban a teljesen saját szoftveres megoldásokra (például a firmware-ben megvalósított szabályzási és jelfeldolgozási megoldásokra, a vezérlőszoftverben kidolgozott technikákra és a mérések feldolgozására) helyezem a hangsúlyt, melyek hozzájárulnak a felhasználási területen ezelőtt használt rendszerekhez képesti kimagasló pontosság és pozícióadat-mennyiség eléréséhez.

Azt, hogy egy ilyen rendszer hogyan működik, illetve, hogy miért van rá szükség, a következő fejezetekben fejtem ki.

1.2 Állatfajok védelme és kártevő monitorozás

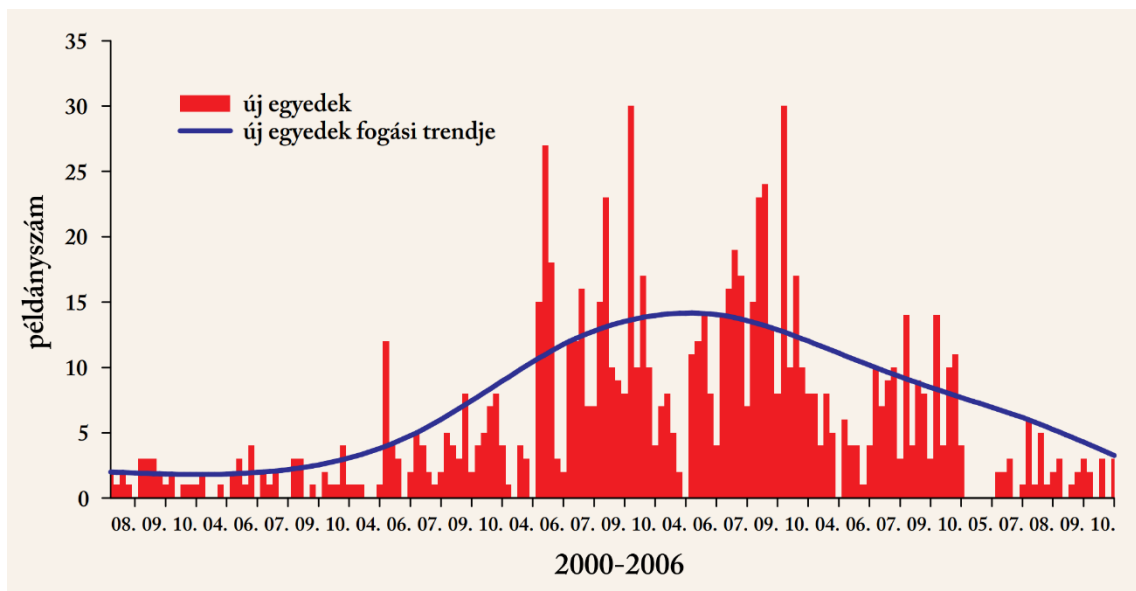
A természetvédelem napjaink egy igen fontos kérdése. A mezőgazdasági és építőipari tevékenységek, valamint az urbanizáció hatására a vadállatok élettere egyre csökkenőben van, ami számos fajt kihalással fenyeget. Így alapvető feladatunkká vált annak megválaszolása, hogy mily módon védhetjük meg az élővilágot ezen veszélyekkel szemben.

A művelés alá vont területek növekedésével a védett fajok mozgásterülete egyre szűkül. A legfőbb feladat annak meghatározása, hogy melyek azok a területek, amelyek szükségesek az adott állat populációk fennmaradásához. Ehhez több tényező meghatározása is szükséges, így pl. az adott faj területhasználat, a preferált élőhelyük növényzete, és hogy a viselkedésüket hogyan befolyásolja egyéb fajok jelenléte. [1]

Jónéhány állatfajt azonban nem, hogy nem fenyegetnek az előzőekben felsorolt tényezők, hanem ellenkezőleg: ideálisak számukra a mezőgazdasági területek, ezért jelentős károkat tudnak okozni a termésben. A védekezés nem triviális ellenük, mivel a méreganyagok használata a növényekre, ezáltal a boltok polcaira kerülő élelmiszerekre is hatással lehet. Ezeknek a kártevőknek, mint például a mezei pocok, az egyedszáma

évről-évre jelentősen változhat. Ennek a jelenségnek a vizsgálatával, amit populációdinamikának neveznek, számos kutatás foglalkozik. A cél elsősorban azoknak az időszakoknak az előrejelzése, amikor nagyon nagy egyedszám megjelenése várható, mert mire észlelhető a túlszaporodás, akkor már nem lehetséges a hatékony védekezés. A védekezésre jó és környezetbarát módszer lehet, ha az adott helyen termesztett növényfajokat úgy választják meg, hogy az ne kedvezzen a kártevők elszaporodásának. Ehhez ismerni kell, hogy mi az állatok preferenciája, mekkora a területhasználatuk, milyen fajok fordulnak elő az adott területen, és azok hogyan élnek egymás mellett.

Ezeknek a kérdéseknek a megválaszolására (is) hasznos technológia a rádiós nyomkövetés, különösen az a változata, amely relatív nagy egyedszámról nagy mennyiségű és megbízható adatot képes gyűjteni.



1. *Microtus oeconomus* egyedek fogási értékének alakulása a mintaterületen 2000-2006 [1]

2 Állatok rádiós nyomkövetése

2.1 Manuális állatmegfigyelési módszerek

Az állatok mozgásának megfigyelésére már a rádiós technikák megjelenése előtt is léteztek módszerek, sőt mind a mai napig használják őket biológiai kutatásokban. Ezek közül kiemelendő a kisemlősök esetében elterjedt elevenfogó csapdák használata. A csapdákat a kutatók a megfigyelt kvadrátokban (ismert nagyságú terület egység) egy rácsszerkezetben helyezik ki, majd adott időközönként ellenőrzik, hogy melyik csapdák fogtak állatokat. Ennek ismeretében lehet levonni következtetéseket a területen élő egyedek számáról, és az általuk használt területről.

A módszer legnagyobb problémája, hogy nagy a humán erőforrás-igénye és mindemellett is (akár több száz csapda rendszeres ellenőrzése nehezen megközelíthető, például mocsaras területen) csak kevés, alacsony információtartalmú adat gyűjthető vele, illetve a csapdák ellenőrzése megzavarhatja az állatok természetes viselkedését, amely csökkenti a gyűjtött adathalmaz megbízhatóságát. [2] [3]

2.2 A hagyományos rádiós nyomkövetés

A rádiós nyomkövetés célja, hogy állatok vagy egyéb autonóm mozgó objektumok helyzetének meghatározását lehetővé tegye. A rádiós nyomkövetés rádióhullámokat használ a pozíció meghatározáshoz. Egy ilyen rendszer tipikusan három komponensből épül fel: egy jeladóból, egy jelvevőből és egy irányérzékeny antennából. A jeladó rögzítésre kerül a megfigyelt egyedre, aminek a sugárzott jeleit az antennával és vevőkészülékkel tudja mérni a felhasználó. [4] [5]

A klasszikus keresési módszer abból áll, hogy az állatokra szerelt rádióadók néhány másodperces szünetekkel, kb. 10-100 milliszekundum hosszúságú modulálatlan vivőt sugároznak ki. A vevőkészülék ezeket a jeleket képes. Visszajelzésként egy



**2. Biológus, aki „hagyományos”
kézivevővel keres egy megfigyelt állatot**
[22]

jellegzetes csipogó hangot ad, vagy számszerűen is megjelenítheti a jel erősségét. A vevőhöz egy irányérzékeny antennát csatlakoztatnak. Ez teszi lehetővé, hogy a felhasználó körbe forogva meg tudja keresni azt az irányt, amerre a vett jel szintje a legerősebb. Ez az irány az elektromágneses sugárzás (síkhullám) normálisával, azaz a terjedés irányával azonos, és ilyen módon a vevőhöz képest az adó irányát jelöli ki. Ennek a módszernek az alkalmazását a gyakorlatban sok tényező nehezíti, mint például a visszaverődések.

Az adóból, a vevőből és irányérzékeny antennából álló konfigurációt felhasználva alapvetően két pozíciómeghatározási módszer alakult ki. Az egyik módszer esetében irányméréseket egymást követően végrehajtva annyira megközelítik a megfigyelt állatot, hogy annak hollétéről egyértelműen meg lehessen győződni. A másik módszer esetében kettő vagy több ismert földrajzi pozícióból végeznek egyidejűleg több mérést, majd a meghatározott irányszögek felhasználásával háromszögelés módszert alkalmazva megbecsülik az állat pozícióját. Ezen módszerek jelentős emberi erőforrásokat igényelnek, és a terepi munkavégzéssel kapcsolatos körülmények még tovább növelik a végrehajtásuk költségeit. Ezért vált szükségessé olyan módszerek kifejlesztése, melyek a mérési folyamatot legalább részlegesen, de akár teljes mértékben automatizálni képesek.

2.3 Automatizált megoldások

A saját megoldásom előnyös tulajdonságai demonstrálásának érdekében bemutatom az ökológia területén is használt, legelterjedtebb automatizált pozíciómeghatározási módszereket:

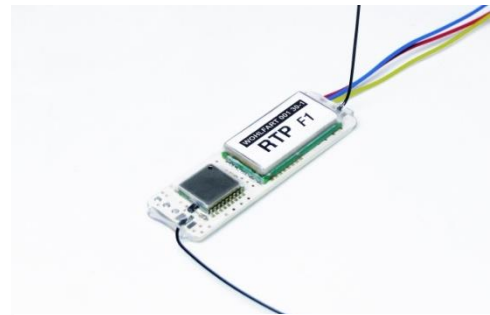
- A **location fingerprinting**, ami omnidirekcionális antennákkal felszerelt vevőkészülékeket használ pozícióbecslések készítéséhez.
- A rögzített, irányérzékeny antennákat használó **Angle of Arrival (AoA) stationary** módszer, amelyik esetében a rádiójelek érkezési irányát becsüljük meg.
- A saját kidolgozású **AoA rotating módszer**, melyet a dolgozat tárgyát képző rendszerhez használtunk. Az AoA stationary-hez képest az antennák mechanikus elforgatására is képes, illetve a vett jelek fázisát is figyelembe veszi.
- A **Global Navigation Satellite System (GNSS)** alapú nyomkövetők.

- A **Time Difference of Arrival (TDoA)** megoldások, melyek a vevőtornyok által detektált jelek érkezési ideje közötti eltérések alapján becsülnék pozíciót.
- A teljesség kedvéért megemlítendő a műholdas **ARGOS** rendszer, melyet csak több száz négyzetkilométeres megfigyelt területek esetében célszerű használni, így közvetlen nem összehasonlítható a saját megoldásunkkal.

2.3.1 GNSS alapú nyomkövetők

Az utóbbi évtizedekben megjelent, állatok megfigyelésére kifejlesztett GNSS alapú megoldások sok esetben jó alternatívát jelentenek. A legismertebb GNSS megoldás a Global Positioning System (GPS).

Az ilyen nyomkövetőkben a pozíciómeghatározást egy GNSS modul végzi. Az így nyert pozícióadatokat vagy mobil hálózaton továbbítják, vagy pont-pont típusú very high frequency, (VHF) vagy ultra high frequency (UHF) kapcsolaton keresztül teszik elérhetővé, vagy magában az állatra szerelt eszközben tárolják és visszafogás után gyűjtik be.



3. Példa egy GNSS alapú jeladóra, melyet egy korábbi projekt keretei között fejlesztettem.

2.3.1.1 Limitációk

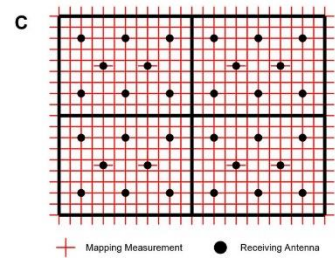
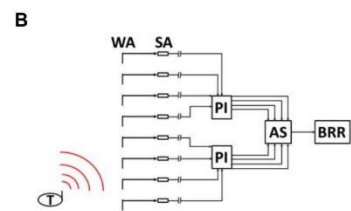
A GNSS alapú megoldásokkal automatizáltan lehet adatokat gyűjteni, például vándorló madarokról, aránylag kis költséggel. Hátránya, hogy nagy energiaigénye van, ezért egy ilyen eszköz tömege, mérete és a mérhető adatok száma közötti összefüggés számos faj vizsgálatát kizárja. (Az 5%-os szabály szerint, mely azt állítja, hogy egy jeladó tömege nem haladhatja meg az állat testtömegének 5%-át [6]) **az emlős fajok ~43%-a [7] és a madárfajok 64%-a [8] egyáltalán nem nyomkövethető műholdas nyomkövetőkkel.** Másik probléma a GNSS pontossága, mivel jónéhány állatfaj által használt terület (angol szakkifejezéssel home range) kisebb, mint a szoba jöhető GNSS megoldások pontossága. (Átlagosan ~50 méter cold start, azaz teljesen kikapcsolt állapotból való bekapcsolás esetében.) [9] [10]

A jelenleg kapható legkisebb GPS-es jeladó [11], ami már a jelek továbbítására is képes (nem szükséges az állat visszafogása), 3.5g tömegű. Az eszköz optimális esetben is kevesebb mint 200 alkalommal tud megpróbálkozni pozícióadat meghatározásával az

elem kis méretéből adódóan. (Cold start esetében ~60 másodperc az első adat. Ebből következik, hogy egy bekapcsolás 0,33 mAh-t fogyaszt, azaz 75 mAh-s elem esetében, ha egyéb fogyasztással nem számolok, ez 225 próbát jelent.) A valós helyzet ennél jellemzően rosszabb. Egy ilyen nyomkövetővel végzett tanulmány [12] szerint, **38 megjelölt madárból, csupán 4-ről érkezett sikeresen kimért pozícióadat.**

2.3.2 Location fingerprinting

A location fingerprinting módszer esetében az állatokat a hagyományos kézikeresésnél is alkalmazott adókkal szerelik fel. A mérés során a vételi jelszintet határozzuk meg (Received Signal Strength, RSS). Míg a hagyományos kézi iránymérés esetében irányérzékeny antennát használva több irányban is megmérjük a jelszintet, és ennek a méréssorozatnak maximuma és minimuma alapján becsüljük az irányt, addig a fingerprinting eljárás esetében több (jellemzően 5-50 darab) omnidirekcionális antennával felszerelt vevőkészüléket használunk fix helyeken telepítve. Egy jeladó adását mind az n darab vevőegység veszi, és az általuk mért jelszintek értékből képzett n elemű vektort tekintjük az aktuális adás „ujjlenyomatának”. Ha ismert a vevőtornyok helyzete, akkor egy megfelelően hangolt fizikai modell segítségével az említett n elemű vektor alapján becsülni tudjuk az adó pozícióját.



4. Sűrű rácson kihelyezett vevők egy elkerített területen [21]

Az „ujjlenyomatot”, tehát a vett jelszintek értékét, illetve relatív viszonyát, több tényező is befolyásolja, úgy, mint a talaj, növényzet, domborzat tulajdonságai és az adó talajhoz képesti magassága, illetve orientációja. Az ezekből adódó hibák lényegesen rontják a módszer pontosságát. Ezért egy másik megközelítés az, hogy feltérképezzük a területet a zavaró tényezők szempontjából. Ebben az esetben a rádióvevők közti területen fel kell vennünk nagyszámú kalibrációs pontot egy jeladót ismert pontokban való elhelyezésével, és azt több orientációban megmérve a vevőkkel. Az adatok egy összerendelést jelentenek az ismert földrajzi helyek és a jelszintvektorok között. Ezen

adatokat felhasználva pontosabban meghatározható lesz egy ismeretlen pont helyzete a mért jelszintvektor alapján.

2.3.2.1 Előnyei és hátrányai

A módszer előnye, hogy egyetlen rövid rádióadás alapján, tehát kis adóoldali energiafelhasználás mellett tudunk egy pozícióbecslést készíteni. Illetve a vevőegységek felépítése is egyszerű és sok állat figyelhető meg egyidejűleg. Hátránya a pontatlanság, amelynek hátterében a fenti okokon kívül az a fizikai tényező is áll, hogy az adó és a vevő közti távolság, illetve az RSS között exponenciális kapcsolat van, ezért a tornyok közelében jó felbontást fogunk kapni, de olyan pontokban, melyek a tornyoktól hasonló távolságban vannak, rosszat. Jó ökölszabály, ha úgy vesszük, hogy 3 torony által közre zárt terület nagyjából negyedeli a becslés pontossága, bár bizonyos kutatások ennél jobb eredményekről számolnak be.

2.3.2.2 Fingerprinting rendszerek a gyakorlatban

Egy hollandiai projekt [13] során 49 tornyot telepítettek szabályos 100 méteres oldalú háromszögrácson és 596 tesztpontot vettek fel kézzel a 520x600 méteres megfigyelt területen. A kutatás szerint ~30 méteres átlagpontosságot tudtak így elérni. Ugyanezt a rendszert használva egy másik projektben [14] a tornyokat véletlenszerűen helyezték ki, átlagosan 215 méteres távolságra egymástól. Ez esetben 62 méteres volt a rendszer átlagos pontatlansága. A tanulmányok szerint a pontosság megállapításához használt tesztadókat több méter magas rudakra rögzítették, azaz a talajszinten mozgó állatokról valójában sokkal pontatlanabb adatokat kapnánk, ami már közelebb viszi az eredményeket az előző fejezetben említett negyedelő ökölszabályhoz. Ebben a rendszerben nem eredményezett minden adás végleges pozícióadatot, helyette nagyjából 1 percnyi (30-60 darab) mérések átlagát vették eredményül.



5. Fingerprinting módszerrel megfigyelt terület [13]

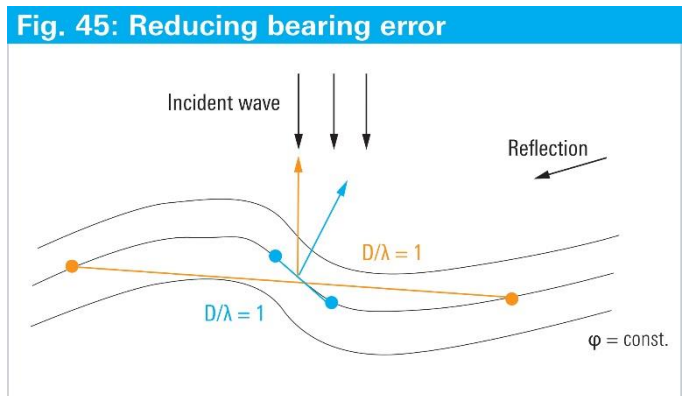
Végül pedig tekintsünk meg egy kutatást, ahol egy kicsi, 30x40 méteres elkerített területet figyeltek meg 32 izotrop antenna és 4 vevőkészülékkel. Az antennákat sűrű, 10 méteres háromszögrácsban helyezték el. Bár a cikkben pontos eredményeket nem közöltek, megbecsülhető, hogy nagyjából 3 méter alatti pontosságot tudtak elérni.

Látszik, hogy ennek a rendszernek a telepítése, kalibrációja és üzemeltetése jelentős feladatot ró a kutatókra. Ehhez képest a saját rendszerünk esetében csupán 3 tornyot használva, aminek a telepítése nem több mint néhány óra, az előbb említett 30x40 méteres területen 0,5 méter alatti pontosság lenne elérhető.

2.3.3 Angle of Arrival (AoA) stationary

A rádióadó irányának adott pozícióból történő meghatározására sok módszer létezik, de mindegyiknek közös vonása, hogy a vételi helyen az elektromágneses hullám hullámfrontjának normálisát igyekszünk meghatározni.

Nehézséget jelent, hogy a környezet okozta visszaverődések miatt a hullámfront „deformált” az elméleti síkhullámnak megfelelőhöz képest. Ez a jelenség hibát idéz elő akkor is, ha maga a mérőrendszer pontos. A probléma kezelhető az antenna hullámhosszhoz viszonyított méretének növelésével, vagy olyan technikákkal, amelyek viszonylag sok pontban mérik lokálisan az elektromágneses teret, és ezen mérések eredményei alapján igyekeznek rekonstruálni a fő hullámfront normálisának irányát.



6. A hullámfront visszaverődések okozta torzulása, és az okozott hiba különböző apertúrájú antennák esetében [10]

Röviden felsorolom a főbb, AoA elven működő módszereket:

- Manuális iránymérés irányérzékeny antennával és kézivevővel
- Adcock, Wattson-Watt iránymérő berendezés
- Doppler effektuson alapuló, kisterületen (adott sugarú körön) kihelyezett antennák kapcsolásával megvalósított iránymérő rendszerek
- Fix pozícióban és orientációban rögzített irányérzékeny antennák rendszere, amelyek jelszintmérő vevőhöz csatlakoznak

- Korrelatív interferométer, super-resolution; korszerű és pontos, de nagyon költséges módszerek, így biológiai területen nem használják. Képesek korrigálni a hullámfront torzulása okozta hibákat

A fent felsorolt módszerek közül ökológiai vizsgálatok során automatizált rendszerekben fix pozícióban és orientációban rögzített irányérzékeny antennák rendszerét használják. Az ilyen rendszerekre gondolhatunk úgy, mint a location fingerprinting továbbfejlesztésére, hiszen több vevőt egy helyen telepítve és az omnidirekcionális antennákat irányérzékenyre cserélve már egy AoA jellegű megoldáshoz érkezünk.

2.3.3.1 AoA rendszerek a gyakorlatban

A legjobb eredményeket produkáló kutatások, amik fix antennarendszeres AoA megoldásokat használtak, 4 fok körüli átlagpontosságról számolnak be.

Az első [15], amerikai kutatásban 4 darab, 12-14 méter magas vevőtornyot telepítettek 6 darab 3 elemes Yagi antennából álló antennarendszerrel felszerelve. A tornyok egymástól 400 és 950 méter közötti távolságra voltak. A tesztek azt mutatták, hogy 28,6 méteres volt a mérések átlagos hibája, ± 12.6 méteres szórással. Bár a szöghibát nem adták meg a cikkben, ez alapján meg lehet becsülni, hogy nagyjából 4 fok körüli lehet a rendszer iránymérési hibája. Megjegyzendő, hogy ezeket az eredményeket magas oszlopokra rögzített tesztjeladókkal érték el, tehát jelentősen kisebb volt a környezeti visszaverődésekből adódó hiba, mintha talaj közelben helyezték volna el az adókat, azaz csak jó környezeti adottságok mellett teljesülnek ezek az értékek.



7. Fix antennás AoA vevőtorny [27]

Egy másik [16] AoA rendszerrel lefolytatott kutatás is hasonló, 30 méteres pontosság körüli eredményekről számolt be. A projektet egy kicsi, 10 négyzetkilométeres területű közép-amerikai szigeten csinálták meg. Kifejezetten magas, a lombkoronaszint fölé emelkedő **40 méteres vevőtornyokat használtak, ami nagymértékben hozzájárulhatott a jó eredményhez.**

2.3.4 Time Difference of Arrival - TDoA

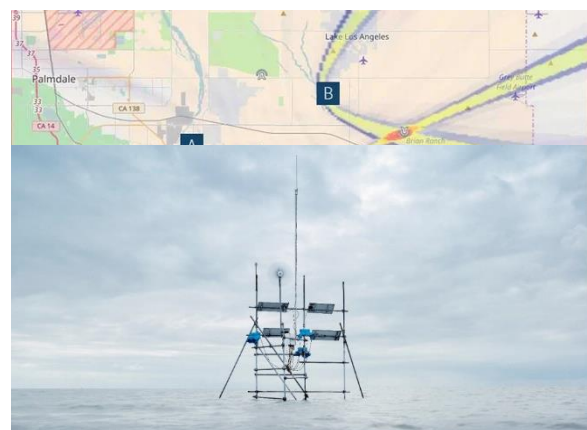
A TDoA esetében legalább 3 vevőtorony van ismert földrajzi koordinátákon elhelyezve. Minden vevőkészülék képes a vett adatcsomagok azonosítására és a vétel idejének ns pontosságú mérésére. A vételi időpontok a vevőkbe épített szinkronizált órák alapján kerülnek meghatározásra. Minden vevőegységpárosra meghatározható egy adott adatcsomag vételéhez tartozó időpontok differenciája. Egy bizonyos idődifferencia csak akkor állhat fenn két eltérő pontban levő vevőre, hogyha a jelforrás egy bizonyos hiperbola valamelyik pontján található meg, hiszen egy hiperbola pontosan azon pontok halmaza, melyek két rögzített ponttól (fókuszpont) való távolságának különbsége állandó. 3 vevőkészülék esetén 3 hiperbolát kapunk, amelyek közös metszéspontja meghatározza a jeladó tornyokhoz képesti pozícióját.

2.3.4.1 A TDoA előnyei és hátrányai

A módszer jó tulajdonsága, hogy már 1 adáscsomag alapján is lehet készíteni pozícióbecslést. A jelenleg egyetlen biológiai célra elérhető TDoA rendszerben, az Atlas-ban egy adás 3 ms hosszúságú és a sávszélessége 1 MHz. Az adatcsomagok hordoznak egy digitális kódot, ami a jeladókat azonosítja. Összességében nagy a rendszer áteresztőképessége, azaz sok állat egyidejű megfigyelését teszi lehetővé.

Megfelelő körülmények között az eddig említett ökológiai célú rendszerekhez képest nagyobb helymeghatározási pontosság érhető el vele. Az ezt befolyásoló tényezők közül az egyik legalapvetőbb az időszinkronizáció pontossága. Ez a biológiai célra fejlesztett eszközökben alkalmazott GPS alapú időreferencia esetében jó esetben 20-30 ns hibát jelent, ami a 6-9 méternek felel meg fénysebességgel számolva.

További, a pontosságot befolyásoló hibaforrások még a következők: a hiperbolák metszéspontjában vett érintőegyenest bezárt szöge, az adó által sugárzott jel zaja (pl. az adó fázis zaja), a többutas terjedés okozta jeltorzulás a vételi helyen, az antenna termikus zaja, egyéb mesterséges jelforrások okozta interferencia és a vevő saját zaja és torzítása. Kiemelendő



8. A Hollandiában telepített Atlas rendszer egy tornya [26]

tényező a vevő sávszélessége is. A nagyobb sávszélesség pontosabban mérhetővé teszi a jelcsomag érkezésének idejét, ugyanakkor rontja a jel-zaj viszonyt. [17]

A számos forrásból származó hibák egy része több mérés átlagolásával csökkenthető, ideális mérési körülmények mellett 5-10 méteres pontosságot ígérnek az Atlas fejlesztői. A Hollandiában telepített rendszer [18] esetében 10 grammos jeladókat használva 8-10 kilométeres hatótáv elérhető a közel ideális, teljesen sík, sekély vízzel borított területen, ahol 10 méter magasan vannak az antennák és madarakat vizsgálnak. Az adók mérete nem csökkenthető jelenleg 1-2 gramm alá.

2.3.5 Globális elérésű rendszerek

A piacon elérhető néhány ökológiai felhasználásra fejlesztett nyomkövető rendszer, melyek az előző megoldásokkal szemben globális elérést biztosítanak. Ez a GNSS-alapú megoldások esetében sem teljesül, hiszen önmagukban csak a globális pozíciómeghatározást biztosítják, az adatok továbbítását a kutatók felé nem. Ahhoz, hogy a továbbítás is globálisan megvalósítható legyen, más technológiákkal kell együttesen használni. A nagy lefedettségnek viszont megvan a hátránya is: ezekkel a rendszerekkel jellemzően nem lehetséges nagy helymeghatározási pontosság elérése. Ebből adódóan csak a röviden ismertetem a két legnépszerűbb ilyen rendszert.

A **Motus Wildlife Tracking** egy madarak megfigyelésére tervezett rendszer, ami több mint 2000 világszerte, de elsősorban Közép- és Észak-Amerikában telepített vevőtornyok hálózatából áll. Motus vevőegységek között akár több száz kilométeres távolság is lehet, így jellemzően nem használható háromszögelés a pozíciók meghatározására, sőt, az sem garantált, hogy akár csak 1 torony is tudja venni a jeladók jeleit. Ebből következik, hogy a rendszer célja nem a madarak mozgásának pontos meghatározása, hanem a megjelölt egyedek által bejárt terület megbecslése.

Az **Argos System** egy műholdas vadvilág megfigyelő rendszer, amelyet havonta több ezer állat megfigyelésére használnak. A rendszer műholdjainak pályadatait ismerve, a földi rádióadók vételi frekvenciaeltolódásából meghatározható azon pontok halmaza, amelyekről az adás érkezhetsz, azonban **a pozícióhiba nagy, néhány 100 méter és 10 km között is lehet**. Például, egy Dél-Oroszországban végzett kutatás [19] során a 0,5 W-os jeladókkal az adások csupán 21%-ából sikerült a pozícióbecslést készíteni, 0,5 és 18,3 km közötti hibával.

3 A saját fejlesztésű automatizált nyomkövetőrendszer

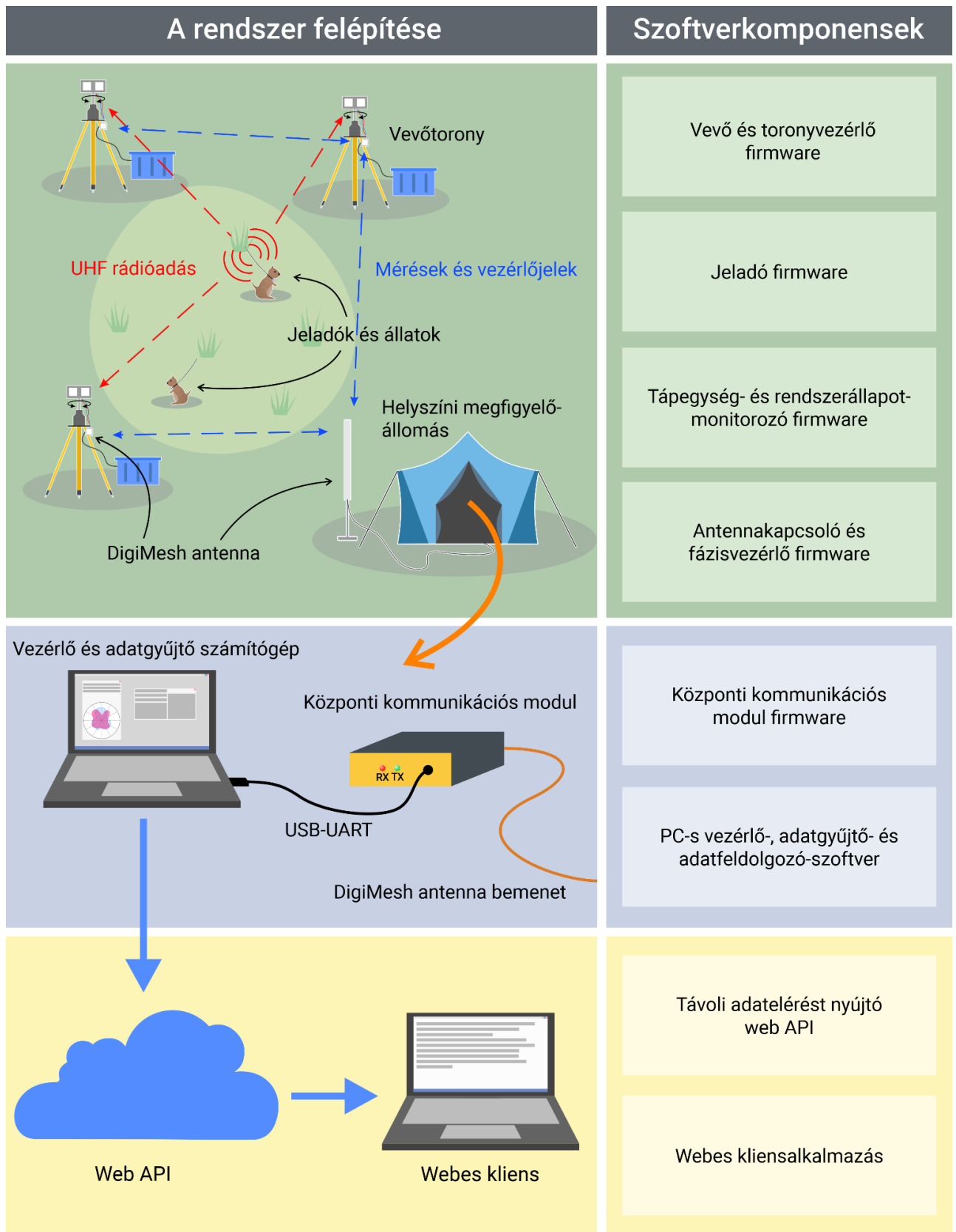
3.1 A Rendszer működési elve

3.1.1 Rendszerkövetelmények

Az előzőekben bemutatott megoldások mindegyikével kapcsolatban lehet előnyöket és hátrányokat felsorolni, és ezek a tulajdonságok nagyjából meghatározzák azt, hogy milyen területen, milyen állatfajok, milyen területi és időléptékű feladatok megoldására alkalmasak. A felsorolt automatizált adatgyűjtésre alkalmas megoldások egyikével sem lehetséges kisméretű (1 gramm alatti tömegű) rádióadók, néhány hektáros területen, pár méteres pontossággal történő pozícióbecslését adni. Ilyen adókkal szokták felszerelni a kisemlősöket, hüllőket, kételtűeket, kistestű madarakat és rovarokat. Mindent egybe véve, a jeladók tömege jellemzően 0,1 és 2 gramm közötti tartományba esik. Ezeknek a vizsgálatoknak az időtartama néhány nap és néhány hónap közé esik, ritkán haladja meg az 1 évet. A vizsgálati, illetve az állatok által használt terület 1 hektár alatti is lehet. A vizsgálatok célja sok esetben az állatok pozíciójának a terület vegetációs térképén való elhelyezése, így viszonylag nagy pontosságra van szükség.

Tehát összefoglalva a fent említett állatfajok vizsgálatára vonatkozó követelményeket, kis méretű jeladókra van szükség, legalább néhány száz méteres hatótávval rossz környezeti viszonyok mellett is, **5-30 napos**, extrém esetekben **1 éves üzemidővel** és **pár méter alatti pozícióbecslési pontosságra**. A pozíciómeghatározások sűrűségére vonatkozó igények az **1-2 pozíció per perc** és a néhány pozíció per óra tartományban szoktak lenni. Legalább **10 állatot kell egyszerre képesnek lennie megfigyelni**. Magát az egész mérőrendszert tipikusan nem fixen telepítik a területen, hanem rövidebb időszakokra állítják fel a helyszínen, azaz fontos, hogy egy adott helyen megfelelő segédeszközöket felhasználva gyorsan telepíthető legyen. Az is szempont volt, hogy az egyetemek és kutatóhelyek pénzügyi lehetőségeit figyelembe véve legyen megvalósítható.

3.1.2 A rendszer felépítése és működése



10. Az automatizált rádiótelemetriás rendszer felépítése és szoftverkomponensei

Automatizált rádiótelemetriás **rendszerünk a területen egyedül választ ad a korábban felsorolt kihívások mindegyikére.** Az elkészült rendszer szoftverkomponenseit én terveztem és fejlesztettem. Részt vettem a hardverfejlesztés bizonyos részeiben is, de a dolgotomban nem erre fektettem a hangsúlyt. A rendszer működését a 10. ábra demonstrálja. 3 fő komponensből áll a rendszer:

- **Jeladókból**, amiket az állatokra rögzítenek a kutatók. A feladatuk, hogy adott ütemezés szerint csatornakódolt rádiójeleket sugározzanak
- **Vevőtornyokból**, amik célja ezeket a rádiójeleket venni és feldolgozni
- Illetve egy **központi egységből**, ami a teljes folyamatot vezérli

A megfigyelt terület köré helyezzük ki a vevőtornyokat, jellemzően 2-4 darabot. Minden antennarendszer egy forgatómotorra van rögzítve, ami lassan végigpásztáz a területet befogó szögtartományon. Eközben a vevő folyamatosan méri és tárolja az állatokra rögzített jeladók jeleit, amiből meghatározható a toronyhoz képesti irányuk, majd több torony adatait kombinálva a pozíciójuk is.

A tornyok önmagukban nem képesek ennek a folyamatnak a végrehajtására, ez a központi vezérlőegység, illetve az annak részét képző PC-s szoftvernek a feladata. A központi egység egy DigiMesh típusú, digitális vezeték nélküli hálózaton keresztül küldi a vezérlő és lekérdező utasításokat a tornyoknak. A szoftver feladatai közé tartozik a mérések indítása és ütemezése, az adatok lekérdezése, feldolgozása, tárolása és megjelenítése. A tárolás megtörténik lokálisan, illetve amennyiben lehetséges stabil internetkapcsolat biztosítása, az adatokat képest átküldeni egy webalkalmazásnak is. Ezen keresztül távolról is monitorozható a rendszer állapota.

3.1.3 Jeladók

A rendszerbe illeszthető rádióadók mikrokontrolleres vezérlésűek, amiknek firmware-jét én írtam. Ez számos, a hagyományos rendszerekre nem jellemző funkciót tesz lehetővé, mint az adások pontos és komplex ütemezését, szenzoradatok továbbítását, és 1 frekvencián több parallel csatorna kialakítását. 1-10 perces sűrűséggel adnak 20-60 másodperc hosszúságú, (látszólag folytonos, valójában rövid impulzusok sorozatából álló) adást az adók. A hosszú adás közben hajtják végre a forgómérést a vevőtornyok.

Mérési, telemetriás adatok átvitelére is lehetőséget ad, ilyen például a környezeti fények mérése, testhőmérséklet mérése (ami a hullók esetében különösképpen fontos),

mikro skálájú mozgásaktivitás mérése inerciális MEMS szenzorokkal, állatok közti interakciók vizsgálata a többi egyeden lévő adók jeleinek detektálásával. A mikrokontroller működéséhez hőmérsékletkompenzált oszcillátorok biztosítják az órajelet. Erre egyrészt a működést biztosító ütemező miatt van szükség, másrészt a mikrokontroller által előállított, az RF vivőt moduláló jelet is pontos időzítéssel kell előállítani, mivel ez szolgál a vevőoldalon az egyes jeladók megkülönböztetésének, a jel-zaj viszony javításának és a pontos jelszintmérés biztosításának alapjául egy korreláció számításra alapuló digitális jelfeldolgozási módszer által.

3.1.4 A vevőtornyok felépítése és működése

Egy vevőtorny kettő vagy több rádióvevő csatornával, illetve bemenettel rendelkezik, amelyek teljesen párhuzamosan képesek jeleket fogadni, illetve feldolgozni. Egy ilyen toronynak a részét képi 1, 2 vagy több antennából álló antennarendszer. Az antennarendszer egyes elemeinek jelei digitálisan vezérelhető fázistoló áramköröket követően különböző kombinációban összegezhetőek. Ilyen módon egy adott antennarendszer típus esetében többféle különböző antennakarakterisztika kombinációja alakítható ki. Ezzel a módszerrel elérhető, hogy egy ilyen antennarendszerrel egy nagyobb szögtartományra vonatkozóan egy



11. Egy vevőtorny kihelyezve a mérési területen

durvább, de globális iránybecslést lehessen adni, ugyanakkor, és ezzel egyidejűleg a jeleket másképp kombinálva olyan szinguláris irányok is kialakíthatók az antennakarakterisztikán, amelyek nagy pontosságú iránymérést tesznek lehetővé. A szinguláris irány az olyan hely a karakterisztikán, ahol elméletileg egy nulla szélességű szögtartományban negatív végtelen az antenna erősítése, tehát egyáltalán nem vesz jelet. Ahhoz, hogy az antennakarakterisztikának ezen helyeit igazán jól ki tudjuk használni, szükséges az antenna mechanikai elforgatása egy antennaforgató-motor segítségével. Összességében megvizsgálva a megvalósítás lehetőségeit, ez a hibrid megoldás bizonyult költséghatékonysági szempontokat is figyelembe véve a legjobbnak. A hardver és a

szoftver felépítése is olyan, hogy sokféle konfiguráció kialakítható a rendszer építőelemeiből, és ezzel az adott kutatási projekt igényeihez lehet igazítani.

3.2 A hardverkomponensek firmware programjai

A következő alfejezetekben a rendszer különböző hardverkomponenseinek általam fejlesztett firmware-eit mutatom be a rádiójelek keletkezésétől kezdve egészen a központi vezérlőegységhez való továbbításukig. A szükséges kontextus megteremtésének érdekében kitérek a hardver működésének bizonyos aspektusaira is.

Itt a komponensek szerepére és rövid ismertetésére fókuszálok, majd a 4. fejezetben részletesen bemutatom azon új módszereket, melyek lehetővé teszik/hozzájárulnak a rendszer nagy pontosságához és egyéb jó tulajdonságaihoz.

3.2.1 A Jeladó firmware

A jeladók firmware-ének tervezésekor alapvető feladatom a jelek csatornázókódolásának megvalósítása, az adások naptáras ütemezése és a szenzoradatok kezelése volt. Ezeknek mindegyike alapvető fontosságú a rendszer működésének szempontjából.

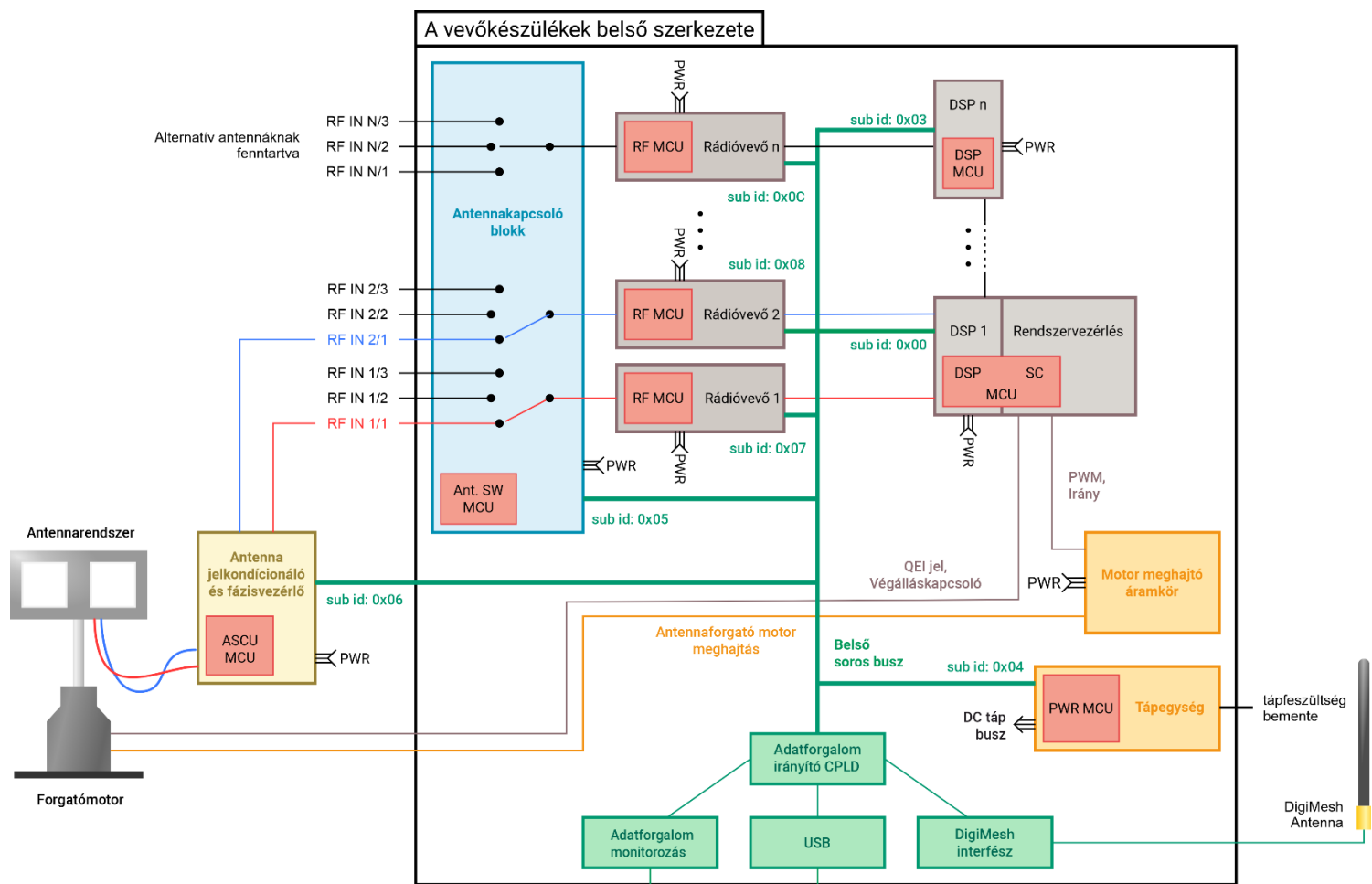
A csatornázó kódolás azért fontos, mert ezzel a módszerrel lehet növelni a link budget-et (az adó által kisugárzott teljesítmény és a vevő érzékenysége közötti különbsége), továbbá megvalósítható vele az adók megkülönböztetése, és nagyfokú zavarvédeltséget biztosít a mesterséges eredetű zajokkal szemben. Még fontos szempont, hogy kisebb kisműködésű mikrokontrollereken is kivitelezhető. Ennek megvalósítására később még kitérek. Az adások naptáras ütemezése felel az rádióadások és mérések szinkronizációjáért. Mivel nincsen egy központi szinkronizációs eszköz, amely jelezhetné, hogy mikor kell az adóknak bekapcsolnia (ehhez az adóknak jelek vételére is képesnek kell lennie), ezért egy nagy pontosságú belső óra feladata megoldani, hogy akár 1 vagy több hónapos üzemidő mellett se csússzon el az adások kezdete túl nagy mértékben (~ 3 s alatt).

3.2.2 A vevőkészülék komponenseinek és programjainak áttekintése

A vevőegység moduláris felépítésű, az egyes funkcionális blokkok fizikailag és szoftveresen is elkülönülnek. A modulok működését mikrokontrollerek és az azon futó firmware-ek vezérlik. A következőkben ezen firmware kapcsolatát és szerepét mutatom

be a rendszer hardverelemeit ábrázoló blokkdiagram segítségével. Az említett modulok a következők:

- Az antennajelek kondicionálását végző modul (opcionális)
- Az antennabemenet-választó (opcionális)
- A rádióvevők
- A központi jelfeldolgozó és vezérlő modul, kiegészítve I/O perifériákkal (gombok, LED-ek, kijelző), UART, USB interface-szel és DigiMesh (DM) hálózati interface-szel, DM RSSI monitorozása
- Tápellátást és a rendszerfelügyeletet biztosító egység (feszültség- és árammérés, hőmérséklet és páratartalom mérése a dobozban), I/O perifériák (gombok, LED-ek, kijelző)
- Bővítő modulok a csatornaszám vagy a párhuzamosan feldolgozható antennabemenetek számának növelésére.



12. A vevőkészülék felépítése

A felsorolt egységek egy aszinkron soros buszra csatlakoznak, amely egy forgalomirányító egységen keresztül a vezeték nélküli kapcsolatot biztosító DM modul (illetve DM hálózat), vagy az USB/UART interfész irányából a központi PC-s vezérlőszoftver (innenről csak PC) számára is elérhető. Az egyes modulok nem kommunikálnak egymással ezen a buszon, így ez lényegében egy PC középpontú csillag topológia a fenti modulokkal a végpontokban. A mérőrendszert jellemzően a DM hálózattal szoktuk használni a gyakorlatban, és ebben az esetben az említett belső busz a DM hálózat egy újabb címzési réteggel kiegészített kiterjesztésének tekinthető. A felsorolt modulok közti magas szintű szinkronizációt a PC biztosítja.

A modulok a PC-ről a DM hálózaton és a fenti buszon keresztül érhetőek el, a torony azonosítóját (1 byte a csomagban) és a modulok alhálózati címét (szintén 1 byte hosszú) felhasználva. A működési paramétereiket lehet beállítani és a rendelkezésre álló adatokat lekérdezni.

A következő fejezetekben néhány a hardveren futó firmware feladatát és működését mutatom be. Bár a vevőhöz 5 firmware programot írtam meg, ezek közül csak azoknak dedikálok külön fejezetet, melyeknek jelentős szerepe van a rendszer működésében.

3.2.3 Központi digitális jelfeldolgozó

A vevőegység központi elemén, ami egy dsPIC típusú digitális jelfeldolgozó mikrokontroller, számos olyan feladatot valósítottam meg amelyek között alacsony szintű, pontos szinkronizációra van szükség:

- A vevőmodulokról érkező analóg jelek digitalizálása és feldolgozása (pl. szűrési és átlagolási műveletek)
- Az antennaforogató motor vezérlőjeleinek előállítása, és szöghelyzetének nyilvántartása.
- A belső buszon parancsok fogadása a PC felől, azok végrehajtása, végül válaszban az eredmények elküldése

A parancsokkal konfigurálható a digitális jelfeldolgozás számos paramétere, illetve így kérdezhetőek le a mérési adatok, kifejtve a pozíciómeghatározás szempontjából releváns jelszintértékekből képzett vektorok, a zaj értékét jellemző mennyiségek és az adók által mért és továbbított szenzoradatok nyers formában.

Minden vevőbemeneten és vételi csatornán vett feldolgozott jel külön-külön tárolásra kerül 2 eltérő módon is. Egyrészt lementi az aktuális maximum értékeket, amit lekérdezés után nulláz, másrészt a mentés történhet az antennaforogató motor aktuális

szöghelyzetével szinkronizáltan. Az utóbbi esetben a mért értékek az antennák szöghelyzetének függvényében lesznek eltérő, ezt szkennelő mérésnek neveztem el.

3.2.4 Tápegység, és rendszerállapot-monitorozó firmware

A tápegységkezelő modul firmware-ének feladata az energiagazdálkodás és meghibásodás esetén az eszköz újraindítása. Ezen feladatok megvalósításához képes mérni a rendszer tápfeszültségeit, áramerősségét és egyéb hasznos szenzoradatokat, mint például hőmérséklet és páratartalom.

Valójában az eszközök tápellátása is egy olyan kérdés, mely befolyásolja a rendszer eredményességét. A rendszernek képesnek kell lennie akár heteken, hónapokon keresztül megállás nélkül üzemelni. Ezért különösen nagy figyelmet kellett fordítani a rendszer nagyfokú stabilitásának elérésére és a vevők alacsony fogyasztására, mivel jellemzően a 230 voltos elektromos hálózat nem érhető el a mérési területeken.

Hosszú idejű futás esetében előfordulhatnak olyan események, akár hardveres, akár szoftveres eredetűek, amik hibát okoznak a rendszerben. Ezért ilyen rendszereknél célszerű adott időközönként teljesen újraindítani az eszközöket. A firmware lehetőséget nyújt a rendszer által használt több különböző tápfeszültség (motor 24V, a digitális rendszereknek 3,3V, bizonyos RF áramkörök pedig 5V) ki- és bekapcsolására, illetve a teljes rendszer újraindítására. Képes alvó üzemmódba lépni, amikor egy akkumulátorról egy évig is üzemképes. Ekkor a nagy fogyasztású DC-DC (Direct Current, egyenáram) konverterek leállnak, beleértve a DM vevő tápellátását, és az eszköz csak egy külön (alacsony fogyasztású) rádióvevőn keresztül ébreszthető fel, melyet szintén ez a firmware kezel.

3.2.5 Központi vevőegység

A központi vevőegység létesít kapcsolatot a vevőtornyok és a PC-s vezérlőszoftver között. A tornyokkal a DM hálózaton, a PC-vel pedig USB/UART kapcsolaton keresztül kommunikál. Ezen kívül a PC-s vezérlőszoftver hardverkulcsként is funkcionál, de erre nem térek ki részletesebben.

A hardveren futó firmware egy egyszerű üzenettovábbítási módszert valósít meg. Két soros kapcsolatot kezel, a DM modullal és a PC-vel. A két irányból érkező byte-okat egy-egy egyszerű FIFO (First In First Out) tárolóba helyezi, majd amint az előző írása befejeződött az adott porton, kiküldi a soron következő byte-ot a megfelelő interfészen.

3.3 A PC-s vezérlő-, adatgyűjtő-, adatfeldolgozószoftver komponensei

Az általam írt PC-s szoftver feladata az automatizált rádiós nyomkövető rendszer vezérlése, monitorozása és az általa mért adatok feldolgozása, tárolása. A program futtatható grafikus felülettel, illetve konzolalkalmazásként is. Ennek az az előnye, hogy így futtatható kisteljesítményű egykártyás számítógépeken is, mint például a Raspberry PI 3-on. Az alábbi alfejezetekben fogom tárgyalni, hogy ezen funkciókat miként valósítottam meg a programban.

Az elkészült szoftver meglehetősen összetett, így a dolgozat terjedelmére való tekintettel csak a rendszer működésének szempontjából alapvető komponenseit részletezem. Jelenleg összesen 25 grafikus felület érhető el a programban eltérő feladatokkal, mint például konfiguráció, vezérlés és adatmegjelenítés. A szoftvert úgy terveztem, hogy az számos modullal rendelkezik, melyekre a dolgozat fókusza miatt nem térek ki bővebben, így a teljesség kedvéért felsorolom a funkciókat röviden: kommunikáció a hardverrel, kézi és automatizált mérések, motorvezérlés, mérési adatok naplózása, távoli elérés biztosítása, másolásvédelem, kommunikáció és adatvizualizáció.

3.3.1 Hardvervezérlési funkciók

A vevőtornyok nem képesek autonóm üzemelni, így a szoftver vezérlő moduljának a feladata megoldani a vevőtornyoknak forgatását, konfigurálását és a mérések elvégzését. Alapvetően a vezérlést két ágra bontottam. Egyrészt szükség van arra, hogy a szoftver automatizáltan, külső beavatkozás nélkül képes legyen az összes hardveres funkció vezérlésére, hiszen így lehetséges, hogy felügyelet nélkül is előállhassanak a mérések. Másrészt fontos, hogy lehessen kézileg is vezérelni a hardvert. Erre elsősorban a rendszer kalibrációja során van szükség, amikor a felhasználók feltérképezik a környezetet, ellenőrzik, hogy minden megfelelően működik-e, illetve amikor referenciapontokat vesznek fel a későbbi adatfeldolgozáshoz.

3.3.2 Kézi vezérlés

A kézi vezérlés esetében a felhasználói felületet úgy terveztem meg, hogy a tornyok és jeladók virtuális reprezentációit a felhasználó ott tudja megadni. Ezeknek a konfigurálása, azaz a jeladók tornyokhoz rendelése, csatorna, szűrő, frekvencia beállítása a felhasználói felületen a paraméterek átírásával történik. Ezeket a módosításokat azonnal

szinkronizálja a hardverrel. Ezt követően már szabadon lehet kiadni forgatási és mérési utasításokat. Az utasításoknak két paramétere van: egyrészt meg kell adni a célirányt, másrészt opcionálisan meg lehet adni a forgási sebességet.

3.3.3 Automatizált vezérlés

A mérések automatizálása egy komplex feladattá is válhat az adott projekt követelményeitől függően. Például, ha tudjuk, hogy a hullók a nappali időszakban aktívabbak, mint este, akkor célszerű sűrűbben gyűjteni az adatokat nappal. Továbbá nagyobb mennyiségű megfigyelt állat esetében nem célszerű az, ha minden jeladó egyszerre ad jelet, mivel a jeleik zajként jelenhetnek meg a másik adók jelein. Ezt úgy lehet például orvosolni, ha több, időben elkülönülő adási sávot hozunk létre, melyekhez egyszerre 2-4 jeladót rendelünk csak. Ehhez arra van szükség, hogy az automatizálás a mérések között képes legyen a rendszer átkonfigurálására. Ezeken kívül még előfordulhat, hogy a tornyokat egymástól teljesen független kelljen vezérelni, például, ha a tornyokkal eltérő szögtartományokat akarunk vizsgálni.

Ezen kritériumokhoz igazodva terveztem meg a program mérési rutin végrehajtó modulját. A mérési rutinok definiálásához egy általam tervezett szintaxisú DSL (Domain Specific Language – Doménspecifikus nyelv) program nyelvet készítettem, amit a program képes értelmezni és végrehajtani. Az elérhető utasítások lefedik azon vezérlési programfunkciókat, melyeket kézileg is végre lehet hajtani. Ezen túl elérhetőek nagy flexibilitással bíró ütemezési utasítások is, melyekkel tetszőlegesen lehet várakoztatni, ismételni, szinkronizálni a mérési lépéseket. A nyelv lehetővé teszi parallel feladatok végrehajtását. Mielőtt egy utasítás lefutna, a futtatókörnyezet megvárja, hogy a hivatkozott tornyok befejezzék az előző feladatukat, csak utána hajtja végre. Amennyiben a két tetszőleges utasítás által hivatkozott tornyok halmazainak metszete üres, az utasítások parallel kerülnek végrehajtásra.

A következő kódrészlet egy egyszerű mérési rutint ír le, amely felváltva megméri 2-2 állat pozícióját -185 és 185 fok közötti tartományban.

```

Main
{
    SetTransmitter(node_x | tr_test, 2)
    SetTransmitter(node_y | tr_test, 2)

    Rotate(node_x | 185)
    Rotate(node_y | -185)

    #Start: node_x, node_y

    MeasureTwo(node_x, node_y | tr0, tr1, 12:29:55, -185, 185)
    MeasureTwo(node_x, node_y | tr2, tr3, 12:31:55, 185, -185)

    Jump(node_x, node_y | Start)
}

MeasureTwo(_n1, _n2 | _tr_a, _tr_b, _startTime, _dir_1, _dir_2)
{
    ConfigureTwo(_n1, _n2 | _tr_a, _tr_b)
    WaitPeriod(_n1, _n2 | _startTime, 00:10:00)
    Measure(_n1 | _dir_1)
    Measure(_n2 | _dir_2)
}

ConfigureTwo(_n1, _n2 | _tr_a, _tr_b)
{
    SetTransmitter(_n1 | _tr_a, 0)
    SetTransmitter(_n1 | _tr_b, 1)
    SetTransmitter(_n2 | _tr_a, 0)
    SetTransmitter(_n2 | _tr_b, 1)
}

```

3.3.4 Adatgyűjtés, naplózás

Ahhoz, hogy a mérési eredményeket a későbbiekben ki lehessen értékelni, előbb el kell menteni őket, ezért készítettem egy saját naplózó rendszert. Több típusú adatfájl is mentésre kerül. Egyrészt vannak logfájlok, amelyek az összes nyers mérési adatot eltárolják. Ennek az az előnye, hogy így az összes adatfeldolgozási lépést utólag is el lehet végezni, akár külön szoftver használatával. Másrészt a program kimentti az irány- és pozícióbecsléseket is, amelyek könnyen értelmezhetőek önmagukban is. A mérési adatokat opcionálisan (ha a mérési helyszínen van internetelérés) felhőben is lehet tárolni. Ehhez készítettem egy külön webalkalmazást, amely lehetőséget nyújt az adatok távoli elérésére.

3.3.5 A rendszer állapotának monitorozása, adatvizualizáció

Bár a rendszer képes automatizáltan működni, arra az esetre is fel kellett készítenem, ha valami nem várt esemény, hiba történik. Például, ha az egyik megfigyelt állat elpusztul, ha rossz jeladó csatorna lett bekonfigurálva, ha el kezd lemerülni a

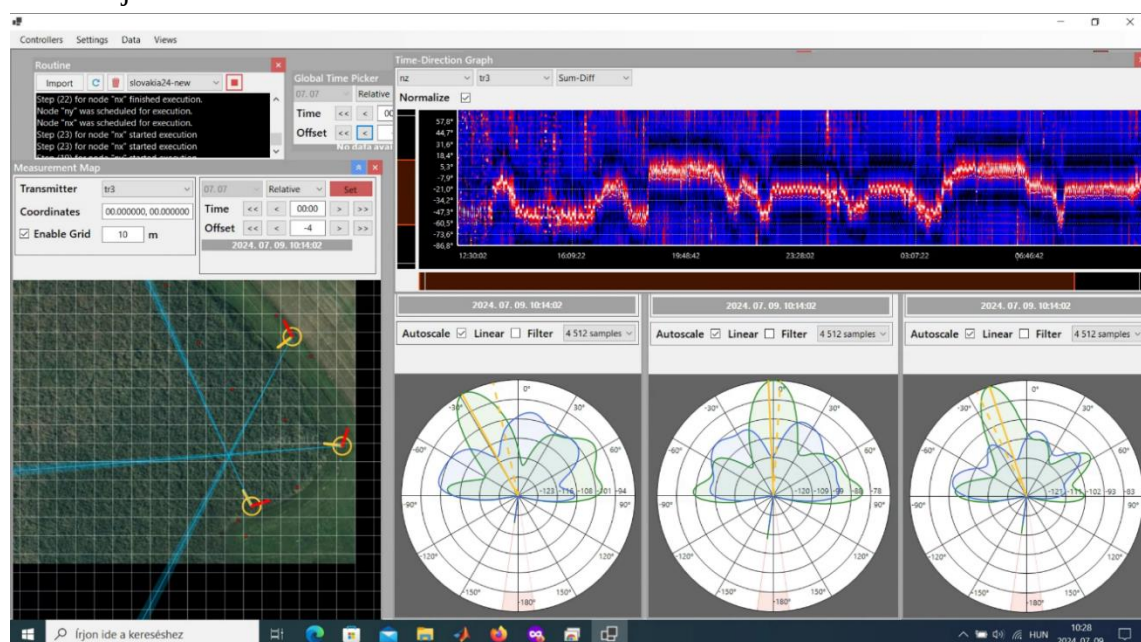
tornyokat üzemeltető akkumulátor, vagy bármi egyéb váratlan esemény bekövetkezik, akkor arról a felhasználóknak értesülnie kell, hogy orvosolni tudják a problémát. Ezért volt fontos feladat, hogy jól használható monitorozási eszközöket fejlesszek a programhoz.

Három adatvizualizációs felületet terveztem, mindegyiket eltérő felhasználási módokra. Első a poláris diagramm, amely a mért jelkarakterisztikát jeleníti meg. Be lehet rajta állítani különféle szűrőket és jelforrásokat. A célja, hogy a vett jelek minőségét lehessen rajta ellenőrizni.

Ezen kívül még van az idő-irány grafikon, amelyen a függőleges tengely a mérési irányokat, a vízszintes az időt mutatja. A jelerősséget pedig a grafikon színezésén lehet látni. Ez a megjelenítő jól mutatja az állatok tornyokhoz képesti mozgását. Például, ha egy állat meghal, akkor látszani fog, hogy az idő szerint nem változik jelentős mértékben a becsült irány.

Végül pedig a becsült pozíciókat egy térképes megjelenítőn lehet megfigyelni, ami alapján könnyebb megkeresni az állatokat.

Azonban a monitorozás nem csak a jelek vizsgálatából áll. Fontos, hogy látható legyen a tornyok akkumulátorainak töltöttsége, a vevődoboz belső hőmérséklete, páratartalma is. Ezekhez is fejlesztettem több megjelenítőt, amik a tornyok állapotáról informálja a felhasználót.



13. Egy képernyőkép az elkészült program adatvizualizációs felületeiről.

3.3.6 Távoli elérés biztosítása

Bár a vezérlőprogramból könnyen ellenőrizhető a rendszer állapota, annyi probléma van vele, hogy az eléréséhez a kutatási területen kell lenni. Ezért fejlesztettem egy olyan kliensprogramot, amely a webalkalmazást használva távolról is elérhetővé teszi, illetve vizualizálja a legfontosabb adatokat.

3.3.7 Adatfeldolgozás

A végső irány- és pozícióbecslés előállítását egy külön méréskiértékelő-szoftver végzi, de több okból is szükséges volt, hogy a vezérlőszoftverben is megvalósítsam. Például a projekt kezdeti kutatási fázisában szükség volt olyan szoftveres eszközökre, melyek azonnal visszajelzést tudnak adni az aktuálisan mért adatokról. De a fő fejlesztési szempontom a rendszerrel végzett ökológiai mérések támogatása volt. Az futásidejű adatfeldolgozás lehetővé teszi a mérések közben az esetlegesen fellépő problémák azonosítását és javítását, a rendszer könnyű konfigurálását, a jeladók visszagyűjtését, illetve a jelen idejű kiértékelés alapján meggyőződhetünk a rendszer sikeres beüzemeléséről is.

Az adatfeldolgozás során a nyers mérési adatokból állítok elő pozícióbecsléseket. Ehhez egy sok lépésből álló adatfeldolgozási csővezetékét dolgoztam ki, amit részletesebben kifejtek a 4. fejezetben.

4 Új módszerek és azok szoftveres implementációja a mérőrendszer pontosságának növelésére

Kis területhasználatú állatok (1-4 ha) mozgását eddig **nem volt lehetséges méter alatti felbontásban**, nagy sűrűségben természetes körülmények között megfigyelni, ezért számít jelentős eredménynek, hogy ezeket mind sikerült elérnünk a saját rendszerünkkel. Ez a teljesítmény számos egyedi technológiai megoldás együtteséből adódik, amelyeket később részletezek.

Összegezve, **5 fő szempont van**, ami szerint érdemes egy automatizált nyomkövető rendszer eredményességét vizsgálni:

- A mérések abszolút és területhez viszonyított pontossága
- A mérések időbeli sűrűsége
- A rendszer üzemideje, és hogy egy állat mennyi ideig figyelhető meg
- A minimális és maximális megfigyelhető terület mérete
- Az egyszerre megfigyelhető állatok száma

A következőkben bemutatom azon általam tervezett fontos szoftveresen megvalósított módszereket, melyekkel hozzájárultam ezen területeken való teljesítmény növeléséhez.

4.1 Jeladók ütemezése

A jeladók műszaki tulajdonságai mind az 5 fent említett tényezőt befolyásolják, viszont az általam fejlesztett firmware közvetlenül 2-t: a mérések sűrűségét és az üzemidőt.

A jeladók adásának vezérlését egy Microchip által gyártott eXtreme Low Power (XLP, rendkívül alacsony fogyasztású) 8 bites szériába tartozó mikrokontroller végzi. C nyelven és Assembly-ben írtam meg a jeladók programját. Működése egy aktív program futtatásból és a mikrokontroller alvó állapotban létéből tevődik össze, amiből az utóbbi teszi ki a futásidő nagy részét. A legfőbb kihívást az üzemidő maximalizálása jelentette, aminek érdekében sok eltérő módszert alkalmaztam a programban.

Alvó állapotban egy extra stabil 1-2 ppm (part per million), de alacsony órajelű 32 kHz-es oszcillátorról fut a mikrokontroller. Erre azért van szükség, hogy biztosítható

legyen az adások pontos ütemezése, viszont aktív programfuttatásra nem alkalmas, mivel túl hosszú lenne a futásidő. Ezért aktív állapotban igény szerint akár többször is átvált az 1-16 MHz nagyságrendű belsőoszillátorra, így rövidítve a mikrokontroller bekapcsolt állapotban töltött idejét.

Az alvó állapotban is biztosítani kell, hogy az adások időzítéséhez használt rendszeróra működjön, amit egy kis fogyasztású hardverszámláló megfelelő konfigurálásával sikerült elérnem. Ezt a külső órajelforrásról hajtom meg, így az alvó állapotban is képes működni. Ha ez a 16 bites számláló túlszordul (ez 2...4...8 másodpercnek felel meg), egy megszakítás generálódik, amitől felébred a mikrokontroller. A megszakítást követően lefutnak a különböző feladatokat végrehajtó függvények, mint például az óra és naptár funkciót megvalósító kód. Ha az ütemezés alapján aktuális, összegyűjti a szenzoradatokat, előzetesen feldolgozza őket, majd előállítja a rádióadó moduláló jelét képző impulzusfolyamot. Ha van opcionális adatgyűjtési funkció beépítve az adóba, akkor az ehhez tartozó EEPROM memóriába írja a szenzoradatokat. A rádióadó modulálójelének előállításához az impulzusok <10 ppm pontosságú időzítése szükséges.

Mivel a mikrokontroller pontos órajele 32,768 kHz, ezért a teljes modulálójel-szekvencia egy assembly kódrészlettel állítottam elő, ahol maguk az utasításvégrehajtási idők látják el az időzítési funkciót. A magasabb szintű műveleteket C-ben kódoltam, mint például az adás paraméterezése.

Egy érdekes megoldandó probléma volt a következő: ha a gépkódú programrészlet generált moduláló impulzuskód hossza meghaladja a fent említett számláló által biztosított időalapot (2...4...8 másodperc), akkor a megszakítás nem az alvó állapotban érne a processzort, hanem a gépkódú rész közben érkezne. Ez nyilvánvalóan nem megengedhető, ezért a modulálójel előállítása alatt letiltom a megszakítást. Viszont az így kimaradó megszakítások miatt az óraregiszterek nem a megfelelő időponton fognak állni. Ezért ilyen esetekben az adásgenerálás végeztével ki kell számítani, hogy az adott adásidő alatt mennyi megszakítás maradt ki. Ennek megfelelően korrigálom a számlálót, majd újra engedélyezem a megszakítást.

4.2 Parallel feladatok futtatása a központi digitális jelfeldolgozó mikrokontrolleren

Azokat a feladatokat, amelyek időzítés szempontjából kritikusak, és ahol a feladatok végrehajtása közben sok adatot kell cserélni, érdemes egy mikrokontrolleren belül megvalósítani. Ezt különösen akkor fontos figyelembe venni, ha a rendszer energiafogyasztása és az órajelfrekvencia is korlátozott. A központi digitális jelfeldolgozó firmware több ilyen időzítés kritikus feladatot valósít meg, mint a jelek mintavételezése, szűrése, a motor vezérlése és a kommunikáció. Ezek lényegében párhuzamos végrehajtást igényelnek. Azt, hogy ezt miként valósítottam meg, a következőkben írom le.

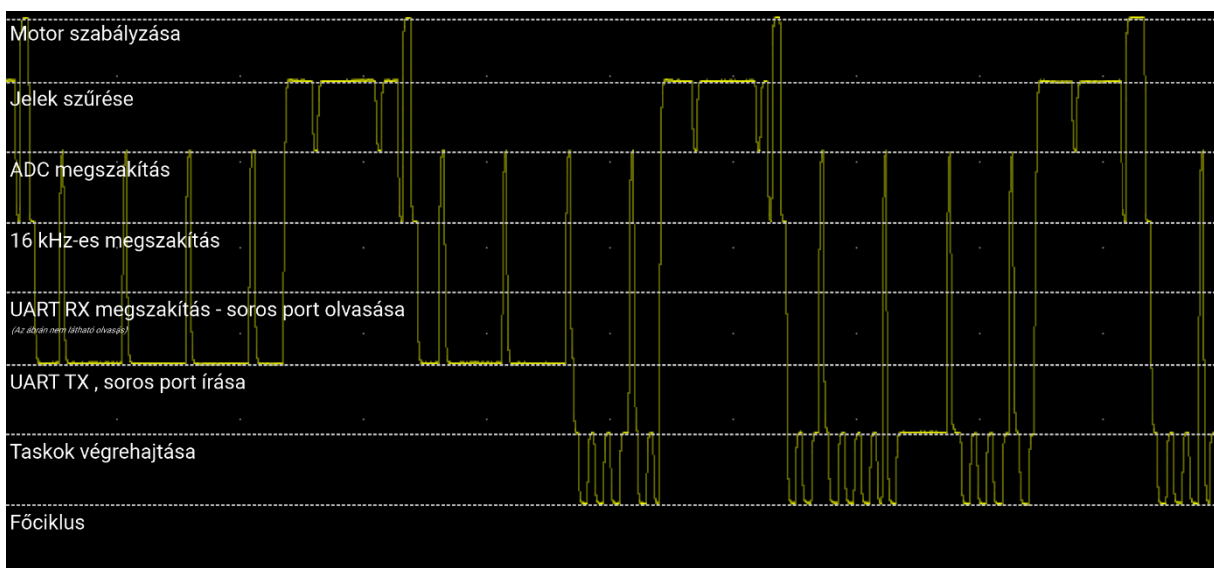
Az AD konverzió 4 csatornán folyamatosan fut kb. 100 kHz-es ütemben, és eredményét egy paramétereztető maximumtartó kód készíti elő a lassabb (~16 kHz) és ezzel aszinkron futó jelfeldolgozó számára. Emellett a PC felől bármikor érkehetnek parallel kiszolgálandó utasítások. Nagyobb adatmennyiséget generáló mérések átküldése a PC-nek akár több mint 1 percet is igénybe vehet (6 csatorna, 2 vevő és 2000 mérési irány esetében 28 KB adat, azaz 389 db 72 byte-os DM csomag, ami 150 ms átlagos csomagátviteli idővel számolva ~58 másodperc). Ezért már a mérési folyamat közben (amikor még forog az antenna és a vevő aktív), parallel elkezdem a részeredmények továbbítását, hogy ne veszítsek időt és azonnal, egy mérés befejeztével újat lehessen indítani.

Jól demonstrálja az előzőekben leírt helyzetet, amikor az antenna forog, és forgás közben, a motor szabályzása mellett történik a jelszintmérés és jelfeldolgozás, az eredmények tárolása, a PC felől érkező lekérdezések fogadása és feldolgozása, valamint a válaszcsoomagok összeállítás és kiküldése. Sőt, a DM hálózaton az adatcsomagok átjutási ideje jelentősen ingadozhat, így ezt is kezelnie kell a firmware-nek.

A megoldás egyik részét a különböző aszinkron feladatok kódjának a megfelelő HW perifériákhoz tartozó megszakítás-kiszolgáló függvényekbe (ISR) szervezés jelentette, például: ADC_ISR – maximumtartó függvények, UART_RX_ISR – kommunikáció a DM felé, Timer_ISR – jelfeldolgozás. A feladatok párhuzamos végrehajtásának másik eszköze egy taszk rendszer implementációja volt. Ezt a megoldást minden a buszra kapcsolódó eszköz, illetve modul esetében alkalmaztam, mivel a kommunikációs sémájuk azonos. Az alábbiakban ezt mutatom be röviden.

Míg az időzítéskritikus feladatok elvégezhetők a megszakításokban (bár ennek elérése is számos optimalizációs trükk bevetését igényelte), az érkező utasítások feldolgozására ez már nem igaz, mivel lefutásuk kifejezetten sokáig tarthat. Egy egyszerű válaszüzenet soros porton kiküldése alatt a szűrőmegszakítás négyszer lefut.

Emellett arra is igény volt, hogy a hosszú feladatok közben, mint például a forgatás (ami 50 másodperc is lehet), a rendszer képes legyen más lekérdezéseket is kiszolgálni. Erre megoldásként fejlesztettem egy egyszerű, pehelysúlyú taszk rendszert, amely a program főciklusában fut. A soros porton érkező utasításokhoz taszkokat rendel, melyeket sorban végrehajt amikor éppen nem fut magasabb prioritású kód. A hosszú ideig tartó taszkokat lépésekre bontja és részenként hajtja végre.



14. Feladatok végrehajtási ideje oszcilloszkóppal megmérve

4.3 Alacsony memóriaigényű SMA szűrő tervezése

A jelfeldolgozás során szükség van egy átlagolási feladat megoldására. Ezt - ahogyan az alábbiakban bemutatom - hosszú mintákon, sok érték átlagolásával kell végrehajtani. A lineáris fázismenetű SMA átlagoló lenne ideális a feladat megoldásához, mivel ez nem torzítja az antennaforgatás során az antennakarakterisztikából adódó jelalakot. Viszont az SMA megvalósításához szükséges memória nem áll rendelkezésre (~4 MB) a DSC-n (Digital Signal Controller). Az EMA átlagoló megvalósítható, de torzulást okoz, ami pontatlanabbá teszi az iránybecslést. Ezért kellett találnom egy megoldást, ami lehetővé teszi az SMA implementálását.

M darab érték átlagolása esetén az EMA átlagolóval csak kisebb SNR (Signal Noise Ratio) javulás érhető el. A másik probléma vele, hogy az antenna forgásának és az

antennakarakterisztikának megfelelően változó amplitúdójú jel valamely szögértékre szimmetriát mutató részletei az EMA átlagoló után elveszítik szimmetriájukat, a lokális minimumhelyek is eltolódnak. Ennek a torzulásnak a korrekciója nem triviális feladat.

Az adók által kisugárzott jel az RF vivőnek egy impulzussorozat szerinti OOK (On-Off Keying) modulációjával áll elő. A vevőben a demodulált alapsávi jel nem egy szokásos OOK / ASK (Amplitude Shift Keying) döntéshozó áramkörre kerül, hanem digitalizálás után további jelfeldolgozáson megy keresztül. Ennek célja az alapsávi jel jel-zaj viszonyának javítása, a jeladók azonosítása, a mesterséges eredetű zavarok és az idegen csatornák jelének elnyomása, a vett jelbe kódolt szenzoradatok dekódolása és a vételi csatorna jelszintjének pontos megmérése.

Általános esetben egy adó által kisugárzott jel egy $\mathbf{T} = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2 \dots \mathbf{b}_k]$ mátrix C elemű $\mathbf{b} = (b_1, b_2 \dots b_C)^T$ oszlopvektoraiból felépített bitminta, ahol b_i a $\mathbf{b}$ vektor i -edik eleme, és $b_i \in (0, 1)$. A vivőt moduláló jel az egyes vektorok bitjeinek adott ütemben történő kiléptetésével (shift-elés) áll elő. Az egyes vektorok egy jelcsomagban többször is előfordulhatnak. Bizonyos esetekben több $\mathbf{b}$ vektorokból bitenkénti logikai műveletekkel célszerű képezni az aktuálisan kiküldendő vektort, ezzel a $\mathbf{T}$ sorainak száma redukálható. A gyakorlati megvalósításban C százas nagyságrendbe esik. Minden jeladóhoz egyedi C érték tartozik, melyek relatív prímek. A $\mathbf{b}$ vektorokra jellemző, hogy kevesebb bennük az 1 és több a 0 szimbólum, vagyis ritkább az olyan érték, amely az OOK moduláció szerint vivőkisugárzást eredményez. Ez az adók fogyasztása miatt is fontos. A fentiek értelmét az adja, hogy a vevőben a vett jelet C darab bitnek megfelelő hosszúságú darabokra osztjuk, majd ezeket egy SMA átlagolóban vektorként összeadjuk. Az átlagolóban lévő vektor adott referenciavektoroktól mért távolsága alapján történik a vett jel további feldolgozása, kiértékelése. Bizonyos megkötések, egyszerűsítések mellett a fenti módszer kisebb fogyasztású mikrokontrolleres rendszereken hatékonyan implementálható.

A továbbiakban csak a legegyszerűbb esetet mutatom be. Legyen $k = 1$ és $\mathbf{b}_i = 1$ ha $i = 1$, egyébként 0. Így egyetlen $\mathbf{b} = (1, 0, 0, \dots, 0, 0)$ vektorral dolgozhatok a továbbiakban. Ha ezt ciklikusan ismételve léptetem ki a moduláló jel előállításához, akkor egy $1/C$ kitöltési tényezőjű impulzussorozatot kapok.

A vevő oldalon a jel A amplitúdójú impulzusok sorozataként (1 érték) illetve zajként (0 érték, ekkor nincs vivőkisugárzás) jelenik meg. Ha ezt a $\mathbf{b}$ vektorból

származtatott jelet mintavételezem és a mintavételi frekvencia úgy van beállítva, hogy $\mathbf{b}$ minden egyes bitjére egy mintavétel jusson, akkor egy C hosszúságú mintavételi sorozatból képezhető az $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_C]$ vektor. Az egymást követő C bitnyi hosszúságú szakaszok mindegyikéből képzünk egy $\mathbf{r}$ vektort. Az A amplitúdójú impulzust „S”-sel és a mintavételezett zajt „N”-nel jelölve az $\mathbf{r}$ vektorok szemléletesen így néznek ki: $\mathbf{r} = (N, N, N, \dots, N, \underline{S}, N, N, \dots, N, N)$. Tehát az $\mathbf{r}$ vektorok egyik eleme mindenképpen az A amplitúdójú impulzusnak megfelelő érték lesz (plusz additív zaj), a többi elem pedig a zaj mintavételezett véletlenszerű értéke. Mivel az adó és a vevő között nincs szinkronizáció, nem tudjuk, hogy melyik r_i vektorelem fogja tartalmazni az A értéket, de az biztos, hogy minden $\mathbf{r}$ vektorban ugyanarra az i -edik elemre fog esni. Célom A értékének meghatározása. A vevő saját zaját ismerjük. Ha az antennáról érkező zaj középértékét is meg tudom határozni, akkor kiszámítható az A korrigált értéke. Ha M darab egymást követő $\mathbf{r}$ vektort összegezek $\mathbf{r}_s = \sum \mathbf{r}$, akkor az impulzus A amplitúdóértékét hordozó r_{sj} vektorelem értéke $r_{sj} = A_s = MA$ lesz, a zaj pedig $r_{sj} = N_s = \sqrt{M}N$. Az impulzushoz adódó zaj esetében is hasonló a helyzet. A $C_2 < C_1$ csatorna impulzusai a C_1 szerinti átlagolást végző algoritmusban a relatív prím viszony miatt csak minden C_2 -dik átlagolási lépésben fognak önmagukkal összegződni.

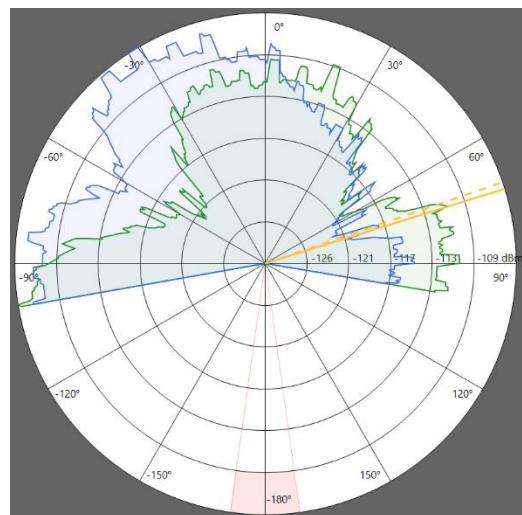
A $\sqrt{M}$ -szeres jel-zaj viszony javulás és a csatornák elkülönítésének legegyszerűbb módját szemléltetik a fent leírtak.

Tegyük fel, hogy C maximális értéke 512. A maximálisan elérhető átlagolások száma 256, és 16 csatorna egyidejű számítására tervezzük a rendszert, vagyis 16 példányban fut az SMA. Az SMA-ban alkalmazott számábrázolás uint16_t (2 byte). Ekkor a szükséges memóriaméret $\text{MemSMA} = 512 \cdot 256 \cdot 16 \cdot 2 = \mathbf{4,194,304 \text{ byte}}$ (4 MB). **Ennyi memória nem áll rendelkezésre a mikrokontrollerekben.** Lehetséges megoldás egy EMA átlagoló használata, ebben az esetben csak $\text{MemEMA} = 512 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 2 = 16384 \text{ byte}$ szükséges. M darab érték átlagolása esetén az EMA átlagolóval csak kisebb SNR (Signal Noise Ratio) javulás érhető el. A másik probléma vele, hogy az antenna forgásának és az antennakarakterisztikának megfelelően változó amplitúdójú jel valamely szögértékre szimmetriát mutató részletei az EMA átlagoló után elveszítik szimmetriájukat, a lokális minimumhelyek is eltolódnak. Ennek a torzulásnak a korrekciója nem triviális feladat.

Az általam kidolgozott eljárásban megvalósítok egy EMA átlagolót. Majd ebben minden C hosszúságú átlagolási periódusban megkeresem az aktuális r_s vektor legnagyobb értékű elemét, ami legyen az n indexű elem, r_{sn} . A maximumkeresés az elemi mintavételezési és EMA számítási lépésekkel szinkronban, valós időben történik. Ez azért fontos, mert ha a j -edik elemi EMA számítási lépésben új maximumot találok, akkor a natív mintavételezett r_j értéket is elmentem egy változóba. Ez a változó a C hosszúságú EMA periódus végén a maximális r_{sn} értékhez tartozó r_n mintavételezett értéket fogja tartalmazni. Ezek után – tehát minden C -edik jelfeldolgozási periódus végén végrehajtok egy SMA lépést is, de már csak az egyetlen r_n (a maximumhoz tartozó) értékre. Tehát ennek az SMA-nak lényegesen kisebb memóriaterületet kell lefoglalni. Így a szükséges memória mérete $\text{MemHybrid} = \text{MemEMA} + \text{MemSMA}_S = 512 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 2 + 1 \cdot 256 \cdot 16 \cdot 2 = 20,480$ byte. **Ez 200-szor kevesebb, mint az eredeti SMA módszer.** Ennek a megoldásnak a korábban említett forgó antennával végrehajtott szkennelő mérések esetén van igazán jelentősége. Ekkor az EMA néhány tized másodperc alatt szinkronizálódik a csatornának megfelelő jelre, és stabilan kijelöli a maximumhoz tartozó natív mintavételezett értéket az SMA-nak. A fenti megoldással **egyértelműen javult az iránybecslés pontossága a korábbi EMA alapú megoldáshoz képest.** Az EMA-k és SMA-k paraméterei a PC-s szoftveren keresztül csatornánként beállíthatóak.

4.4 Csatornák közötti interferencia csökkentése

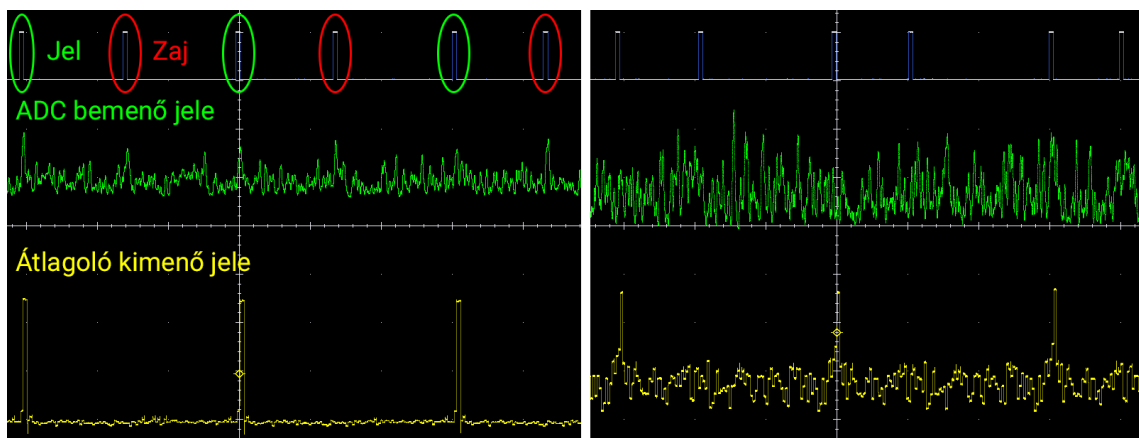
Az előző fejezetben bemutatott SMA átlagoló használata, egy a csatornák interferenciájából adódó problémához vezetett. Ahogyan a 15. ábra is mutatja, a szkennelő méréseken periodikusan megjelenő tüskék alakultak ki, amely jelentősen megnehezíti az adatok kiértékelését, illetve ez a becslések minőségén is ront. Mint rájöttem, ez nem egy implementációs hiba eredménye, hanem az SMA átlagoló egy bizonyos tulajdonságából adódik. Azt, hogy mi áll ennek a jelenségnek a hátterében, illetve, hogy milyen megoldást találtam a javítására, a következőkben írom le.



15. Az interferencia jelenség egy mérésen

Legyen C a venni kívánt csatorna, és C_d a zavaró csatorna hossza. Az EMA megvalósítása a programban a következő: $S_{i+1} = S_i - \frac{S_i}{k} + x$, ahol x az átlagoló bemenő értéke, X pedig a kimeneti értéke, S egy belső változó (sum/összeg), k pedig a szűrő paramétere. (Nagyobb k esetén lassabban konvergál az átlagoló egy adott x bemeneti értékhez.) Állandó x bemeneti érték esetén $S_i = kx$ értékhez tart. Konstans x bemenet esetén pedig, ha a kimeneti értéket $X = \frac{S_i}{k}$ szerint kiszámítjuk, akkor a $X = x$ kimenet adódik. Ebből következik, hogy a csak egyetlen mintavételt érintő, nem C periódus szerint ismétlődő D nagyságú zavaró jelrészlet az átlagoló kimenetén D/k értékkel jelenik meg, míg a venni kívánt jel csillapíthatatlanul. Tehát kellően nagy k érték esetén az EMA átlagolóban nem fognak az impulzusszerű, vevőt túlvezérlő zavarok sem olyan értékkel megjelenni, amely meghaladná a venni kívánt jel értéket, így a maximumkereső algoritmus a megfelelő jelet fogja megtalálni.

Az SMA szűrővel más a helyzet, előfordulhat, hogy a zavaró impulzus egyidőben jelenik meg a venni kívánt jellel. Ha a zavar jóval nagyobb, mint a hasznos jel, a mintavételezett érték is sokkal nagyobb lesz. Amennyiben közel egyenlő amplitúdójú a venni kívánttal (itt figyelembe kell venni, hogy a két jel már az antennán összeadódik), akkor a jelek fázisától függően a zavar csökkentheti vagy növelheti is a jelet. Míg az EMA esetében $k = 64 \dots 256$, addig az SMA átlagolási hossza lehet alacsonyabb, $4 \dots 16$ körüli érték is. Tegyük fel, hogy az SMA 10 értéket átlagol, és a jel amplitúdója 20 ($A = 20$). Ekkor az átlagoló kimeneti értéke is 20. Ha érkezik egy $A_D=200$ értékű zavar, akkor az átlagolóban az összeg 400 lesz, kimeneti értéke pedig 40, és ez az állapot fennmarad 10 SMA mintavételi lépésen keresztül. Ezt szemlélteti az alábbi 16. ábra:



16. ADC bemenő jel átlagolás előtt és után, illetve 20 dB-vel csökkentett jelerősség esetében.

A problémára a következő megoldást találtam: Számítással és a mérési eredmények vizsgálatával is megállapítható, hogy a venni kívánt jel értéke sem az állatok mozgása, sem az antenna forgása miatt nem változhat két mintavétel között egy bizonyos értéket meghaladó mértékben (a gyakorlatban ez az AD konverter felbontásának néhány százaléka), tehát a vételi jelszint (RRS) két SMA mintavétel közötti megváltozására megadható egy feltétel $|RSS_i - RSS_{i-1}| < L$. Kivétel ez alól az adó ki- és bekapcsolása, de ez nem a mérési folyamat közben történik. Amikor az SMA egy újabb natív ADC értéket kap, azt összehasonlítja az előző eltárolt ADC értékkel. Ha az eltérés abszolút értéke meghaladja az L limitet, akkor biztos, hogy valamilyen zavaró jel adódott hozzá a venni kívánt jelhez. Ez leggyakrabban egy másik adó jelének egy impulzusa. Ebben az esetben előjelesen csonkolom az ADC-ről érkező értéket. **Ezzel a megoldással a bemutatott jelenség gyakorlatilag megszüntethető.** Az L paraméter értéke minden egyes jeladóra optimálisan beállítható a PC programban a C csatornaszám, az antenna szögsebessége és az alkalmazott antenna karakterisztikájának megfelelően.

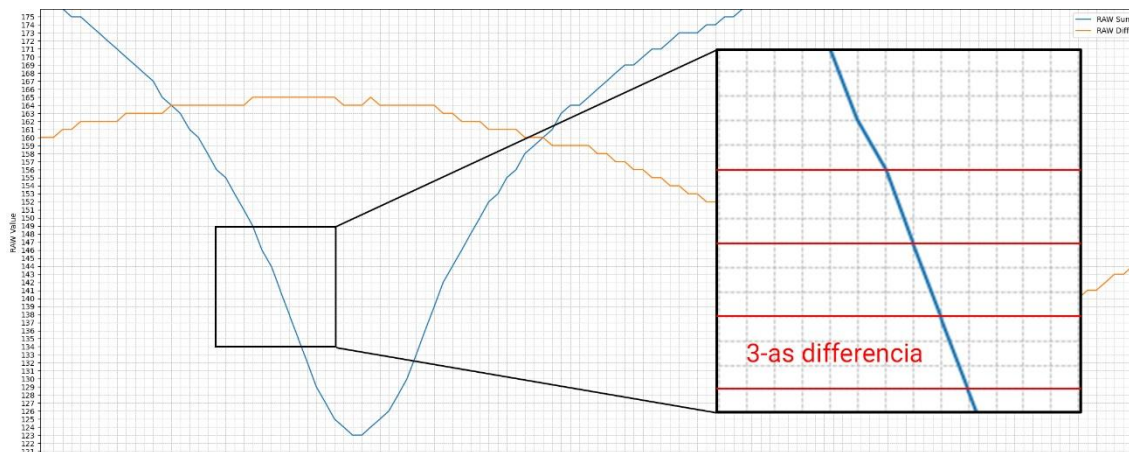
4.5 Mérési adatok tömörítése

Ahogy az a parallel feladatok futtatásáról szóló fejezetben is említettem, bár gyorsabb lett az adatok átvitele azáltal, hogy már mérés közben elkezdtem átküldeni őket a PC-nek, még így is a DM hálózaton keresztüli alacsony adatátviteli sebesség **több 10 másodperc fölöslegesen várakozáshoz vezet** a mérések között (a mérés hossza a forgási tartomány szerint 20-50 másodperc között van), azaz csökken a mérési sűrűség. Ez azért probléma, mivel gyorsan mozgó állatfajok esetében az adatsűrűség csökkenése fontos pozícióadatok elvesztését jelentheti. Például, ha egy megfigyelt madár leszáll egy faágra, de csak kevesebb időre, mint a mérések közt eltelt idő, akkor ezt nem biztos, hogy rögzíteni fogja a rendszer.

Ezért megoldást kellett találnom az adatátviteli idő csökkentésére. Az egyik lehetséges út a DigiMesh technológia lecserélése lehetett volna, például egy Wi-Fi technológián alapuló irányított antennás megoldásra, de végül több okból nem ezt választottam. Egyrészt a DM fogyasztása alacsonyabb, ami kedvező az alternatívákhoz képest. A mérések helyszínén jellemzően csak akkumulátorról üzemeltethető a rendszer, így ez egy fontos szempont a tornyok üzemideje szempontjából. Másrészt a cseréhez a hardveren nagy módosításokat kellett volna elvégezni, ami a szoftveres módosításhoz képest időigényesebb és a költsége is jelentős lehet.

Mivel a hardver tulajdonságaiból adódóan az adatátviteli sebesség fix, következik, hogy a megoldást az átvitt adatmennyiség csökkentése fogja jelenteni, amihez egy tömörítési algoritmust kellett készítenem. Az algoritmusnak a következő követelményeknek kell megfelelnie: a soron következő adategység feldolgozásához csak már korábban feldolgozottakat lehet használni (mivel mérés közben fut az algoritmus, így nem létezik a teljes adatkészlet a lekérdezés pillanatában), az algoritmus lefutásának ideje (maximális méretű adatcsomag esetében) elhanyagolhatóan rövid legyen az adatátviteli időhöz viszonyítva, és megfelelő mértékben tömörítse az adatokat ahhoz, hogy az időegységre jutó lekérdezhető adatmennyiség meghaladja az időegység alatt mért adatok mennyiségét.

Ezek alapján egy delta tömörítésen (más néven „differenciális” tömörítés) alapuló algoritmust terveztem. [20] A saját módszeremet a szűrt rádiójelek azon jellegzetességére alapoztam, hogy az értékük nem változhat két mintavétel között egy bizonyos értéket meghaladó mértékben (lásd Csatornák közötti interferencia csökkentése fejezet). Eltérő körülmények között (rossz/jó jel-zaj viszony, mozgó jeladó, nagy háttérzaj) számos mérést készítettem, melyeket kiértékelve, arra jutottam, hogy a maximális differencia értéke 3, így erre alapoztam a módszert. A 17. ábra egy tesztmérés kiértékelését mutatja.



17. Az ábra demonstrálja a legmeredekebb szakaszban előforduló maximális differencia értékét.

Ha az 1 byte méretű jelek értéke helyett az egymást követő jelek differenciáját tárolhatom, az több mint 2-szeres tömörítést jelent, mivel a ± 3 differencia 3 biten tárolható. Csomagonként pedig elég, ha csak az első jelet tárolom abszolút. A módszer tömörítési hatékonyságát az alábbi képletek adják meg:

Ha N jelöli a tömörített jelek számát és B jelöli a byteok számát, akkor tömörítéssel az $N = \left\lfloor \frac{(B-1)8}{3} \right\rfloor + 1$ képlet adja meg a B darab byte-ban kódolható adatmennyiséget. Az algoritmus hatékonyságát ezt a képletet B -vel leosztva kapjuk meg.

$$C = \frac{\left\lfloor \frac{(B-1)8}{3} \right\rfloor + 1}{B}$$

Ha B -t helyettesítjük 72-vel, ami a DM csomagok mérete, akkor az adódik, hogy **2,64-szer több adat vihető át egyetlen csomagban**. Az algoritmust az alábbi módon implementáltam:

```
while (ptr <= (data + c - 1) || cntr < 6) {
    INTERRUPT_PROTECT( curr = array[s]; );
    comp = compress(val, curr);
    //if (z > 15) z = 0;
    val += (int8_t)comp;
    ptr = feed_bytes(comp, &cntr, ptr);
    s++;
}

static inline uint8_t compress(uint8_t val, uint8_t curr)
{
    int8_t c = curr - val;
    if (c < -4) return -4;
    else if (c > 3) return 3;
    else return c;
}

static inline uint8_t * feed_bytes(uint8_t val, uint8_t * cntr, uint8_t * s)
{
    uint8_t diff = 8 - *cntr;
    uint8_t num = min(diff, 3);

    *s = (*s << num) + ((val & 0b00000111) >> (3 - num));
    if (diff < 4)
    {
        s++;
        *s = val & ((uint8_t)0b11111111 >> (5 + num));
    }
    *cntr = 0b00000111 & (*cntr + 3);
    return s;
}
```

4.6 Mérések kiértékelése a PC-s szoftverben

A nyers mérési adatok kiértékelése során a céloom a lehető legpontosabb irány- és pozícióbecslések előállítása.

Ehhez egy sok lépésből álló adatfeldolgozási csővezetékot dolgoztam ki. A nyers mérési adatok a mérési szögtartományban egymástól azonos szögdifferentiával készített jelszintmérésekből állnak. Ezek a jelszintmérések vevőtornyoként és jeladónként el vannak különítve. A jelek először átmennek egy vagy több finite impulse response (FIR)

szűrőn, majd egy tetszőlegesen kiválasztható komplex szűrőn, ami egyszerre több jeltípust is kombinál. Ezt követően a program végrehajt egy iránybecslést a szűrt jeleken, aminek a végeredménye a megfigyelt állat toronyhoz képesti iránya, végül pedig ezeket az iránybecsléseket kombinálva kiháromszögeli az állatok becsült koordinátáit.

4.6.1 Jelek kiértékelése

A mérés után a hardvertől a jeleket byte tömbök formátumában lehet lekérdezni. A hardveren a jeleket 1536 elemű tömbökben tárolom, ami nagyjából 400 fokot fed le. Ebből adódóan megközelítőleg 0,26 fokos sűrűséggel vannak tárolva a jelek, viszont a pontos érték potméteres forgatómotorok esetében példányonként eltérhet. Mindegyik irányhoz jeladónként négy értéket tárolok. Egy szumma jelet, egy differencia jelet és a kimért környezeti zaj értékét mindkét vevőhöz. A mérési eredmények feldolgozásához először ezeket az adatokat kell lekérdezni a szoftverből.

A nyers adatok átalakításáért és tárolásáért a szoftverben a *szkennelő mérés* modul felel. A feladata, hogy a nyers jeleket dBm-re (decibel-milliwatt) konvertálja, a jelekhez tartozó mérési irányt fokba átszámolja és eltárolja a további feldolgozáshoz. A zajjal korrigált jelszintet (*rss*) a zaj (*rawNoise*) és a zajos jel (*rawSignal*) digitalizált értéke, valamint a dBm-ben (logaritmizált) lineáris vevőkarakterisztika (*sens*, *offset*) alapján lehet kiszámolni az alábbi képlettel:

$$rss = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{rawSignal \cdot sens + offset}{10}} - 10^{\frac{rawNoise \cdot sens + offset}{10}} \right)$$

4.6.2 Jelek szűrése

Bár a szkennelő mérésben tárolt jeleket már dBm-re alakítottam, még nehéz pontos iránybecslést csinálni belőlük. Ennek több oka is van. Egyrészt a nyers jelek felbontása alacsony, csupán 8 bites, ezért a legerősebb jel irányában gyakran több szomszédos jelnek is azonos az értéke. Másrészt a környezeti zajok kisebb-nagyobb egyenletlenségeket adnak hozzá a jelhez. Ezek orvosolásához az adatokat végigfutattam egy szűrőn, ami kisimítja a jelek görbáját.

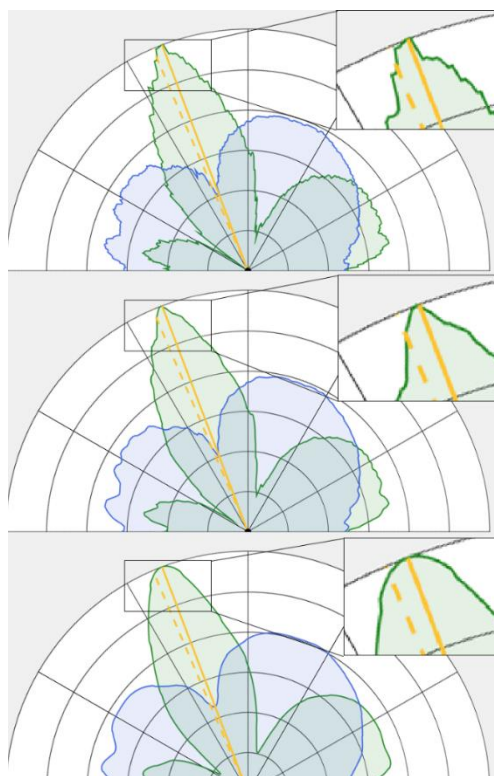
4.6.3 A szűrők működése

Mivel a fejlesztés kezdetén még nem lehetett tudni, hogy milyen típusú szűrőket érdemes használni, ezért ki kellett kísérleteznem a legjobb megoldásokat.

Alapvetően cirkuláris szűrőket valósítottam meg. Például egy medián szűrőnél ez azt jelenti, hogyha az utolsó tömb cellánál jár, akkor az ablak elemeibe beveszi a tömb első elemeit, azaz a tömb „utolsó” cellája után újra az első cella jön. Ennek a kezelése kifejezetten fontos, hiszen a tornyok körbe forognak, így annak érdekében, hogy ne legyen elugrás a görbében, ilyen módon kell szűrni a jeleket. A végleges verzióban két *IFilter* szűrő implementáció van. A *MedianFilter* és a *FirFilter* osztályok.

4.6.3.1 A FIR szűrő

A FIR szűrő diszkrét konvolúciót valósít meg. A működési elve, hogy a szűrő együtthatóinak vektorát végigtolja a szürendő értékek vektorán, és minden lépésben összeszorozza a kitakart értékeket az együtthatókkal. Annyiban eltér a hagyományos FIR szűrőtől, hogy a bemeneti függvény 0-360 fokban reprezentált, ezért cirkulárisan valósítottam meg. A szűrő együtthatók a teljes körön vannak értelmezve, és körbe forgatom őket a szürendő jelen. Az együtthatók tetszőlegesek megválaszthatók, a program fájlokból tölti be őket.



18. Egy mérés szűrő nélkül, medián szűrővel és FIR szűrővel

4.6.3.2 A Medián szűrő

A medián szűrő lényege, hogy egy „n” páratlan szám hosszúságú ablakot tol végig az értékeken, és minden esetben az értékek alapján sorrendezett középső elemet választja ki. A jelfeldolgozási csővezetékben a FIR szűrő előtt fut le, amennyiben be van kapcsolva.

A gyakorlatban, végül nem bizonyult különösebben hasznosnak, mivel nem eredményezett egyértelmű javulást az iránybecslési pontosságban. Ennek az oka az lehet, hogy a motor lassú forgása, az irány szerint tárolt mérések nagy felbontása és a hardveren futó előzetes szűrés miatt az adatsor nem tartalmaz kiugró értékeket, amiket az algoritmus egyébként jól javítana.

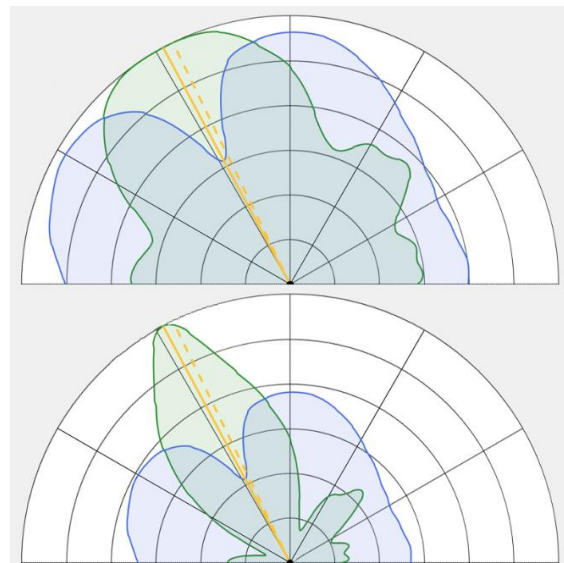
4.6.4 Iránybecslés

A szűréshez hasonlóan az iránybecslésre sincsen 1 fixen jó módszer. Emiatt úgy írtam meg a rendszert, hogy **futásidőben lehessen váltani az elérhető becslési módszerek között**. Sok kísérleti módszert implementáltam a kutatási-fejlesztés folyamat során, amik közül 3 vált be igazán.

Egyik a *Szumma-differencia maximum* becslő. A lényege, hogy a *szumma* és *differencia* jeleket az alábbi képlet szerint kombinálja, majd kikeresi azt az irányt, amerre az így kapott érték a legnagyobb:

$$Szum + (Szum - Diff)$$

Ez azért működik igazán jól, mivel a *szum* jel értéke globálisan a jeladó irányába a legerősebb, de a görbéje lokálisan tompa, viszont a *diff* jel görbéjének pedig a jeladó irányába hegyes lokális minimuma van, de nem feltétlenül ez a globális minimum is. Így a *szum* jel görbéjének tompa globális maximum tulajdonságát kombinálva a *diff* jel görbéjének lokális hegyes minimumával egy pontos megoldást kapunk.



19. A szum és a szum-diff jelek összehasonlítása

A következő *Relatív Szumma-Differencia Maximum* becslő szimplán a *szum* és a *diff* jel különbségét képzi, és azon keresi a maximumot. Az előzőnél még egyszerűbb, de sok esetben a becslés szempontjából jobb eredményt ad. Ennek az oka az, hogy szűri az olyan zavarokat, melyek mindkét jelen hasonló mértékben jelennek meg. Hátránya az, hogy polár-grafikonon ábrázolva a karakterisztikája miatt a felhasználó számára nehezebben értelmezhető.

Az utolsó jól teljesítő megoldást *több pontos becslő*nek neveztem, amit a *MultiPointEstimator* osztályban írtam meg. A lényege röviden, hogy az előző módszerhez hasonlóan kikeresi a *szum-diff* maximumot, majd ettől negatív és pozitív irányba kikeresi az első lokális maximum értékeket a *szum* és *diff* jelek különbsége által alkotott görbén, végül pedig az irányaik átlagát számolja ki eredményül. Ezt arra a

megfigyelésre alapoztam, hogy a *szum – diff* jelek karakterisztikáján a jeladó irányához képest negatív és pozitív irányba azonos távolságra van két csúcsérték.

4.6.5 Pozícióbecslés

Sok esetben a pontos pozícióbecslések számításához nem elég az egy mérési csoportba tartozó iránybecslések ismerete, hanem korábbi és későbbi mérésekre is szükség lehet. Ezért a végleges becslések nem ebben a szoftverben, hanem az utófeldolgozásban lesznek meghatározva. A pontatlan pozícióbecslés félrevezethető lehet a felhasználók számára, ezért a szoftver is csak az iránymérések eredményeit jeleníti meg, amin könnyebben észrevehető egy téves mérés. Ettől függetlenül implementáltam a pozícióbecslést is a programban. Ez szimplán, az előző lépésben kiszámolt iránybecslésekből képzett, a tornyok koordinátaíra fektetett félegyenesek metszéspontjainak átlagát számolja ki. Figyelembe veszi az adott torony által mért jelerősséget is, csak azon iránybecsléseket használja fel, ahol a becsült irányban a jelerősség meghalad egy küszöbértéket.

5 Eredmények bemutatása

5.1 Összehasonlítás az alternatív megoldásokkal

Az összehasonlítás tárgyát képező eltérő rendszerek teljesítményét a forrásként szolgáló cikkek szerzői eltérő körülmények között és módszertannal mérték meg. Jellemzően a nyomkövetési módszerek működésének szempontjából kedvező feltételeket választottak. Például az ATLAS TDoA rendszerhez kizárólag olyan kutatásokat találtam, ahol minden esetben volt rálátás a jeladókra a vevőtornyoktól, a mérések helyszíne pedig teljesen lapos, vékony vízréteggel volt borítva. Ez rádiótelemetriás mérések szempontjából földi viszonylatban közel optimálisnak mondható. Ehhez képest a saját rendszerünkkel jelentősen rosszabb, csak sűrű sásos, nádas aljnövényzettel borított területen végeztünk méréseket, mivel ez felel meg a rendszerrel eddig vizsgált állatfajok természetes élőhelyének. Továbbá jelentős eltérés van a projektek költségvetésében, az eszközök telepítési komplexitásában, gyűjthető adatmennyiségben, üzemidőben és a vizsgálható állatfajokban. Ebből adódóan a pontossági adatokat az egyéb információkat figyelembevéve érdemes értékelni.

A GPS-es nyomkövetők pontosságának vizsgálatára saját méréseket végeztem. Általánosan nem lehet a módszer pontosságát meghatározni, mivel a körülményektől függően az átlagos hiba lehet ~5 m körül, de akár 60 m felett is. A táblázatban szereplő adatok egy hosszú üzemidőre optimalizált eszközökből származnak.

Forrás	Módszer	Állatfajok	Közeg/Növényzet	Mérések között eltelt idő (perc)	Tesztelési terület (ha)
[13]	Fingerprinting	-	Nyílt mező, néhány bokor	1	31.2
[13]	TDoA	-	Nyílt mező, néhány bokor	1	31.2
[21]	Fingerprinting	Ürgék	Ritka aljnövényzet	2	0.48
[15]	AoA	Verébsármányok	Levegő	3	15
[16]	AoA	Nagytestű emlősök	Esőerdő	5	600
[14]	Fingerprinting	-	Sík, reptér	3	-
[18]	ATLAS - TDoA	Madarak	Teljesen sík, vékony víztakaró	0.2	3500
[18]	ATLAS - TDoA	Madarak	Teljesen sík, vékony víztakaró	0.2	3500
-	GNSS/GPS	-	Égbolt részlegesen kitakarva	180	-
saját	AoA rotating	Északi pockok	Sűrű, magas aljnövényzet	1	2

Forrás	Módszer	Vevők száma	Vevők átlagos távolsága (m)	vevőtorny magasság (m)	Megjegyzések
[13]	Fingerprinting	49	100	-	Azonos rendszer két eltérő mérési és kiértékelési módszerrel.
[13]	TDoA	49	100	-	
[21]	Fingerprinting	32	12	1	Nem osztottak meg pontos adatokat.
[15]	AoA	4	600	14	Nem adták meg a pontosság meghatározásának módszerét,
[16]	AoA	7	1500	40	Csak nagytesű állatok esetében működött a jeladók mérete miatt.
[14]	Fingerprinting	72	216	9	Tornyok véletlenszerű szerkezetben kihelyezve.
[18]	ATLAS - TDoA	4	3500	8	Ezek azonos rendszer adatai 2 esetben. Egyik esetben 3 torony látta az adót a másokban 4.
[18]	ATLAS - TDoA	3	3500	8	
-	GNSS/GPS	-	-	-	Saját mérési eredmények
saját	AoA rotating	3	100	2	A saját rendszer - Magasabb torony alkalmazásával még tovább javulna a mérések pontossága.

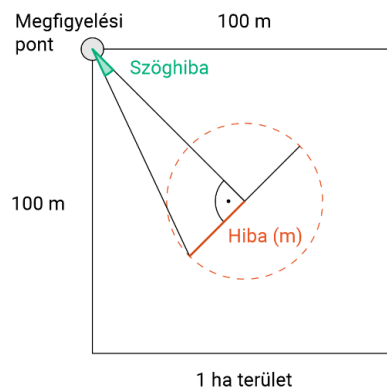
A fenti két táblázat az adott eszköz/kutatás által megvalósított módszert és a mérési körülményeket írja le. A harmadik táblázat értelmezéséhez a következőket érdemes figyelembe venni: Egyes megfigyelt állatfajok röpképesek, így jó a vevők rálátása az adókra. A növényzet és egyéb környezeti viszonyok is jelentős hatással vannak a rendszerek pontosságára. A vevők számának és távolságának hatása rendszerfüggő. AoA típusú megoldások esetében a szöghiba konstans a távolság szerint (feltételezve a jó jel-zaj viszonyt), de a méterre számolt pontosság már nem. Viszont a tornyok számának növelésével ez is javítható. A fingerprinting módszer méterben megadott pontossága a tornyok által képzett rács celláinak méretétől függ. A TDoA méterben megadott átlagos pontossága állandó a tornyok távolságának függvényében, feltéve, hogy nincsenek

Forrás	Módszer	Átlag pontosság (m)	konfidencia intervallum 95% (m)	Első kvartilis (m)	Harmadik kvartilis (m)	Szórás (m)	1 ha-ra vetített szöghiba*	100 ha-ra vetített szöghiba*
[13]	Fingerprinting	30.1	2.8	18.6	46.8	-	27.5	27.5
[13]	TDoA	43.1	5	24.1	82.6	-	31.6	3.16
[21]	Fingerprinting	3	-	-	-	-	23.4	23.4
[15]	AoA	28.6	-	-	-	12.6	4.2	4.2
[16]	AoA	42	-	-	-	34	4	4
[14]	Fingerprinting	62.23	30.1	-	-	-	22.4	22.4
[18]	ATLAS - TDoA	6.5	-	-	-	7.5	5.3	0.53
[18]	ATLAS - TDoA	11.1	-	-	-	19	9	0.91
-	GNSS/GPS	30	-	-	-	-	23.2	2.45
saját	AoA rotating	0.5	0.0125	-	-	-	0.41	0.41

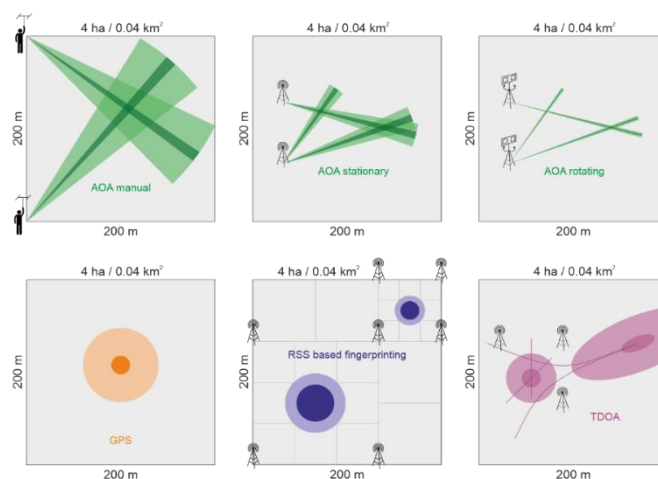
* A területre vetített egyenértékű szöghiba a módszerek összehasonlíthatóságának érdekében lett bevezetve.

visszaverődések, nem romlik jelentősen a jel-zaj viszony (ez egy ponton túl elkerülhetetlen), és hogy minden torony képes venni az adó jelét.

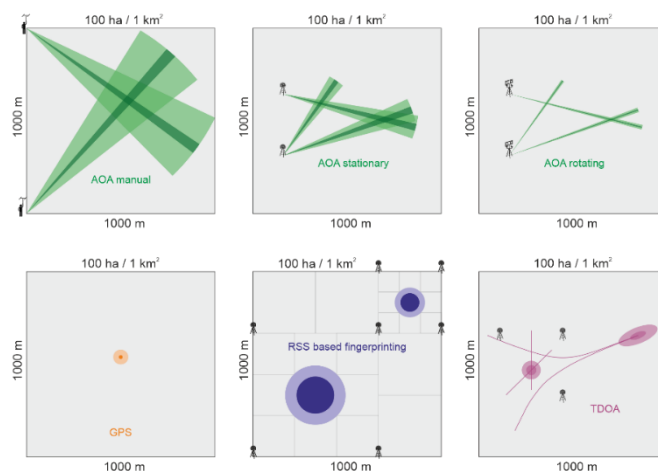
A módszerek pontosság szempontjából való összehasonlíthatóságának érdekében bevezettem a területre vetített egyenértékű szöghiba fogalmát. Ez módszerenként eltérő módon számítható ki. Az AoA esetében nincs szükség az egyenértékű szöghiba számítására, viszont azon módszerek esetében, amelyek nem iránymérés alapján végzik a pozícióbecslést, úgy határoztam meg ezt az értéket egy adott méretű négyzetes területre vonatkozóan, hogy a megfigyelőpontot az egyik sarokba helyezem, az



22. Területre vetített egyenértékű szöghiba kiszámítása



20. Rádiós nyomkövetési módszerek pontosságának szemléletes összehasonlítása 200x200 méteres megfigyelési



21. 1000x1000 méteres megfigyelési terület esetében

átlagos hibának megfelelő kört veszek fel a terület közepén és kiszámítom, hogy ezen kör sugara milyen szög alatt látszik a sarokpontból.

A Hiba! A hivatkozási forrás nem található.. és Hiba! A hivatkozási forrás nem található.. ábrák segítségével demonstrálom vizuálisan is, hogy ezen módszerek pozícióbecslési hibái hogyan aránylanak egymáshoz a vizsgált terület mérete szerint. Látható, hogy a terület növelésével, a méretéhez viszonyított relatív hiba egyes módszerek esetében csökken, mások esetében pedig megközelítőleg változatlan marad. (Az AoA módszerek esetében az iránymérések által kimetszett terület jelöli a hiba mértékét.)

5.1.1 AoA rotating – ATLAS TDoA összehasonlítás

A bemutatott adatok alapján látható, hogy **az általunk kidolgozott módszer 1 hektáros vizsgálati területek esetében** (kisemlősöknél jellemző méret) **a legjobb eredményt éri el** az elérhető megoldások közül. De 100 hektáros területnél az ATLAS TDoA rendszer már hasonlóan, nagyobbaknál pedig látszólag akár jobban teljesíthet.

De a valós körülmények között, jellemzően mégis a saját rendszerünk teljesít jobban, még 100 ha fölött is. Ennek az oka, hogy a terület méretének növekedésével, változatlan vevőtoronyszámot feltételezve, a vett jelek jelszintje csökken, és így a jel-zaj viszony romlik. Az ATLAS rendszer esetében alkalmazott sáv szélesség 1-5 MHz, míg a saját AoA rotating technológia esetében csak 10 kHz. Ez azt jelenti, hogy a mi megoldásunk esetében **minimum 30 dB-lel jobb a jel-zaj viszony az ATLAS-hoz képest**, ami azonos környezeti viszonyok mellett, körülbelül **8-szoros hatótávot jelent**. (TDoA megoldásoknál a rendszerekben lévő korrelátor lényegesen javítja a jel-zaj viszonyt, de ez a javulás megfelel annak, amit a saját rendszerünkben az átlagolás kapcsán bemutatam. Ezért a 30 dB-es link budget különbség, a keskenysávú rendszer javára így is fennáll, azonos teljesítményű adókat feltételezve).

Sok olyan mérést végeztünk, amelyek célja a rendszer hatótávolságának vizsgálatára irányult különböző környezeti felételek mellett. A kisemlősökon használt jeladók jele **közvetlen rálátás esetén 100 km-ről** is vehető, ugyanakkor egy sűrű nádasban, úgy, hogy a vízszint magasságában mozognak az állatok, **a hatótáv néhány 100 méterre csökken**. Az ATLAS rendszert bemutató publikációkban sík, növényzettől mentes környezetben vizsgálnak repülő állatokat magasan elhelyezett antennákkal. A tapasztalataink alapján, a 30 dB-vel alacsonyabb link budget **nem lenne elegendő a rossz**

körülmények között, például 100 hektáron való méréshez, ami a mi rendszerünkkel még megvalósítható. Azaz hiába, hogy 100 hektár felett az ATLAS már pontosabb a publikációk szerint, valójában a gyakori rossz terepi viszonyok mellett ekkora területen már nem is működőképes, míg a saját megoldásunk még igen.

5.2 Visszajelzés

Az elmúlt évben több mint 10 biológussal együttműködésben végrehajtott projektben került használatra a rendszer. Ezeknek a vizsgálatoknak a hossza 2 és 12 nap közé esett. A biológus kutatóktól egyöntetűen pozitív volt a visszajelzés. Eddig az állatok területhasználatát csak csapdázással tudták vizsgálni, ami jó esetben is csak napi 1 pozíciót jelent állatonként. Ezzel a rendszerrel viszont **pár perces bontásban volt figyelhető az állatok mozgása, ami eddig még nem volt lehetséges kisemlősök esetében.** Az eddigi eredmények alapján jelenleg több, tervek szerint hamarosan megjelenő publikáción is dolgoznak a kutatók.

Feltűnt a terepi mérések során az a probléma, hogy a felhasználók nehezen tudták értelmezni a komplex grafikonokon megjelenő adatokat. Ezért a jövőben szükséges lesz foglalkoznom azzal is, hogy hogyan lehet átláthatóbbá tenni őket anélkül, hogy a komplexitásukat beáldoznám.

5.3 Tapasztalatok

A kisebb-nagyobb hibák és a vizsgálatok során felvetődő újabb igényeknek megfelelő módosítások, kiegészítések után, az utolsó 3 terepi projektet a biológus kollégák már önállóan végre tudták hajtani. Én csak online kapcsolaton keresztül ellenőriztem, hogy minden rendben működik-e. A viszonylag nagy mennyiségű mérési adat tárolásra került, menet közben jól követhető volt az állatok mozgása, és lehetett látni, ha egy állatot elpusztult. A különböző projektek során eltérő mérési rutinokat írtam a feladatnak és a helyi adottságoknak megfelelően. Az egyes megjelölt állatok pozíciói 2 és 10 perc közötti gyakorisággal lettek meghatározva.

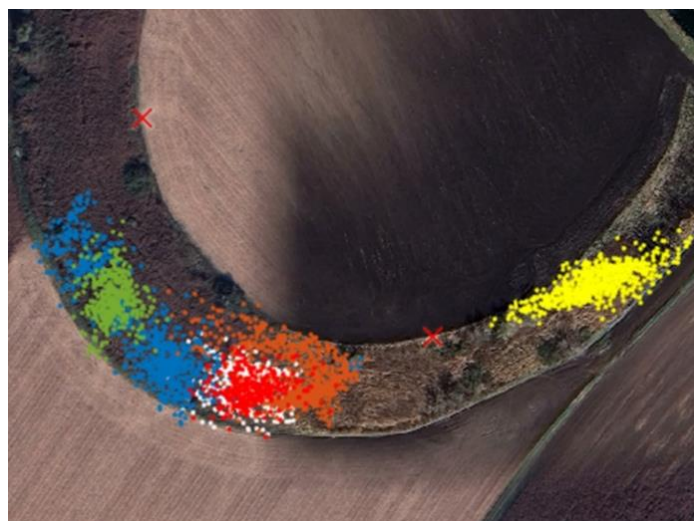
Az alábbi példákban a színek a különböző egyedeket kódolják, így a biológusok számára megfigyelhető, hogy egy adott időszak alatt egy állat mekkora és milyen területet használt. Általában a vizsgálatoknak ez az elsőszerű célja, mivel így tudják például a növényzet minősége és az állatok által használt terület közti összefüggést megállapítani. Az ábrán például jól látható (ami egy alapvető kérdés volt ennél a vizsgálatnál), hogy a

megfigyelt északi pockok nem hagyták el sűrű sást, nem mentek ki a mezőgazdasági területre.

Kidolgoztam egy weboldalt (24. ábra), amivel az állatok mozgása is megfigyelhető felgyorsítva. A TDK dolgozatomban bemutatott PC szoftver kimeneti fájljai némi utófeldolgozás után betölthetők ezen az oldalon. Ez egy nagy újdonság, mivel **ezt megelőzőleg senki sem volt képes ennyire kistestű állatoknál akkora sűrűségű és pontosságú pozíció-adatokat kimérni, hogy olyan animációt lehessen készíteni, amin még az állatok közti interakciók is megfigyelhetők.** Ennek az etológia területén is nagy jelentősége lehet.



24. Az animációs felület [29]



23. 6 darab északi pocok területhasználata

5.4 Eredmények összegzése

Mindent összegezve, munkám során a következő eredményeket értem el:

- Kidolgoztam egy szoftverrendszert, mely segítségével minden, ezen a biológiai kutatási területen használt módszernél pontosabban végezhetjük kis területhasználatú állatok megfigyelését.
- A mérőrendszer összes MCU és DSC firmware-jét én terveztem és fejlesztettem.
- Terveztem a digitális jelfeldolgozási folyamathoz egy SMA átagolót, amely 4 MB-ról 20 kB-ra csökkentette az algoritmus memóriaigényét.
- Az alkalmazott digitális csatornázó eljárást oly módon tovább fejlesztettem, hogy a csatornák közti interferencia jelenség csökkenjen.
- A rendszer adatforgalmát biztosító rádiós hálózaton történő adatátvitelhez kidolgoztam egy, a mért jelek sajátosságán alapuló tömörítési megoldást.
- A mérőrendszer automatizálására és vezérlésére kidolgoztam egy saját doménspecifikus nyelvet.
- Valós terepi mérések eredményeit kiértékelve kerestem és fejlesztettem iránybecslési módszereket, az iránybecsléssel kapcsolatos több hipotézist a gyakorlatban is megvizsgáltam.
- Az elkészült rádiótelemetriás rendszerünket már több mint 10 hazai és külföldi biológiai projektben használták, ezeknek többségében részt vettem és technikai támogatást nyújtottam.

A dolgozatomban bemutatott eredményeken túl, jelenleg is dolgozom a rendszer továbbfejlesztésén, mint például az utófeldolgozás integrálásán a PC-s vezérlőszoftverbe, a valós idejű kalibrációs módszer megvalósításán, nagyobb pontosságú és hatótávolságú irányérzékeny antennák jeleinek feldolgozásán és a korrelatív iránybecslő implementálásán a PC-s szoftverben.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni egykori szakdolgozati témavezetőmnek és egyben jelen TDK dolgozatom egyik konzulensének, Tóth Tibornak, hogy bátorított arra, hogy a szakdolgozatomat továbbfejlesszem és elinduljak a TDK-n, valamint köszönöm a sok segítő visszajelzését és az időt, amit a dolgozatomra fordított.

Köszönöm a másik konzulensemnek, Dr. Kővári Bencének, hogy bevezetett a tudományos szakszövegírás alapjaiba, és hozzájárult a TDK dolgozatom tudományos és formai alakításához.

Köszönöm Dr. Miklós Ákosnak a szakmai segítségét, és hogy a saját rendszerünkkel eddig megvalósult kutatási projektek során keletkezett mérési adatok utófeldolgozásában segített.

Köszönöm a szüleim sokoldal támogatását és biztatását.

6 Hivatkozások

- [1] G. András, „Az északi pocok populáció-dinamikai vizsgálata a Szigetközben,” Budapest, 2010.
- [2] A. Botelho, P. D'Andrea, C. Crisóstomo, M. Silveira, C. Lucio, P. Santos, C. R. Bonvicino and R. Gentile, "Evaluating the efficiency of different sampling techniques to survey non-flying small mammals in the Amazon," *Mammal Research*, 2023.
- [3] F. Lemckert, T. Brassil, R. Kavanagh és B. Law, „Trapping small mammals for research and management: How many die and why?,” *Australian Mammalogy*, %1. kötet28., pp. 201-207., 2006..
- [4] L. D. Mech, Handbook of Animal Radio-Tracking, Minnesota, USA: University of Minnesota Press, 1983.
- [5] J. J. M. -. J. M. Marzluff, Radio Tracking and Animal Populations, London, UK: Academic Press, 2001.
- [6] D. & F. M. Murray, „A Critical Review of the Effects of Marking on the Biology of Vertebrates,” in *Research Techniques in Animal Ecology*, New York, Columbia University Press, 2000, pp. 15-64..
- [7] F. A. Smith, S. K. Lyons, S. K. M. Ernest, K. E. Jones, D. M. Kaufman, T. Dayan, P. A. Marquet, J. H. Brown és J. P. Haskell, „Body mass of late Quaternary mammals,” *Ecology*, %1. kötet84, 2003.
- [8] T. Lislevand, J. Figuerola és T. Székely, „AVIAN BODY SIZES IN RELATION TO FECUNDITY, MATING SYSTEM, DISPLAY BEHAVIOR, AND RESOURCE SHARING,” *Ecology*, %1. kötet88, 2007.
- [9] R. E. Kenward, A Manual for Wildlife Radio Tagging, London, UK: Academic Press, 2001.

- [10] Rohde & Schwarz, „<https://rohde-schwarz.com>,” 2010-2011. [Online]. Available: https://cdn.rohde-schwarz.com/us/campaigns_2/a_d/Introduction-Into-Theory-of-Direction-Finding.pdf. [Hozzáférés dátuma: 20 11 2023].
- [11] Lotek, „<https://www.lotek.com>,” [Online]. Available: <https://www.lotek.com/products/pinpoint-gps-argos/>. [Hozzáférés dátuma: 12 10 2024].
- [12] A. Scarpignato, A.-L. Harrison, D. Newstead, L. Niles, R. Porter, M. Tillaart és P. Marra, „Field-testing a new miniaturized GPS-Argos satellite transmitter (3.5 g) on migratory shorebirds,” *Wader Study*, %1. kötet123., 2016.
- [13] C. Tyson, R. Fragueira, E. Sansano-Sansano, H. Yu és M. Naguib, „Fingerprint localisation for fine-scale wildlife tracking using automated radio telemetry,” *Methods in Ecology and Evolution*, 2024..
- [14] P. KL, B. KM, C. ZB, G. RMP, B. KW, R. HS és P. EH, „Optimizing trilateration estimates for tracking fine-scale movement of wildlife using automated radio telemetry networks,” *Ecology and Evolution*, 2022..
- [15] A. Celis-Murillo, W. Schelsky, T. J. Benson, M. I. M. Louder és M. P. Ward, „Patterns, correlates, and paternity consequences of extraterritorial foray behavior in the field sparrow (*Spizella pusilla*): an automated telemetry approach,” *Behavioral Ecology and Sociobiology*, %1. kötet71., 2017..
- [16] R. Kays, S. Tilak, M. Crofoot, T. Fountain, D. Obando, A. Ortega, F. Kümmeth, J. Mandel, J. G. Swenson, T. Lambert, B. Hirsch és M. Wikelski, „Tracking Animal Location and Activity with an Automated Radio Telemetry System in a Tropical Rainforest,” *The Computer Journal*, %1. kötet54., 2011..
- [17] O. Kishon, *The ATLAS Wildlife Localization System: System Design and Implementation*, Izrael: Tel Aviv University, 2015.
- [18] C. E. Beardsworth, E. Gobbens, F. van Maarseveen, B. Denissen, A. Dekinga, R. Nathan, S. Toledo és A. I. Bijleveld, „Validating ATLAS: A regional-scale high-throughput tracking system,” *Methods in Ecology and Evolution*, 2022..

- [19] M. Dubinin, A. Lushchekina és V. C. Radeloff, „Performance and accuracy of Argos transmitters for wildlife monitoring in Southern Russia,” *European Journal of Wildlife Research*, 2010.
- [20] S. W. Smith, „Chapter 27: Data Compression,” in *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, San Diego, California, California Technical Publishing, 1999., p. 486..
- [21] G. E. Wallace, M. Boucher és S. Rachel Phelps, „An Automated Radio-Telemetry System (ARTS) for Monitoring Small Mammals,” *Methods in Ecology and Evolution*, 2021..
- [22] University of Illinois, „<https://vetmed.illinois.edu>,” [Online]. Available: <https://vetmed.illinois.edu/wel/week-2-radio-telemetry/>. [Hozzáférés dátuma: 18 11 2023].
- [23] S. W. Smith, *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California, USA: California Technical Pub, 1997.
- [24] Digi International Inc., „<https://www.digi.com>,” 2022. [Online]. Available: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90002277.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 5 szeptember 2022].
- [25] C. Marketing, „<https://www.crfs.com>,” [Online]. Available: <https://www.crfs.com/blog/how-accurate-tdoa-geolocation>. [Hozzáférés dátuma: 13. 10. 2024.].
- [26] E. Hartmann, „<https://www.nioz.nl>,” 02. 10. 2020.. [Online]. Available: <https://www.nioz.nl/en/blog/watlas-x-niozatsea>. [Hozzáférés dátuma: 13. 10. 2024.].
- [27] J. Madore, „<https://www.nsf.gov>,” [Online]. Available: https://www.nsf.gov/news/news_images.jsp?cntn_id=136811&org=NSF. [Hozzáférés dátuma: 13. 10. 2024.].
- [28] <https://wildlifecomputers.com>, „<https://wildlifecomputers.com>,” [Online]. Available: <https://wildlifecomputers.com/data/technologies/argos/>. [Hozzáférés dátuma: 13. 10. 2024.].

[29] R. Wohlfart, „<https://ricsiw.github.io/>,” 10. 2024.. [Online]. Available: <https://ricsiw.github.io/MapsSite/bratislava-24/>. [Hozzáférés dátuma: 20. 10. 2024.].