

Nagytávolságú pont-pont vízfelszíni kapcsolat LoRa alapon

Molnár Zsolt, Braun Ferenc

Molnár Zsolt, Óbudai Egyetem, Bécsi út 96/B, 1034, Budapest,
molnar.zsolt@kvk.uni-obuda.hu

Braun Ferenc, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Konkoly-Thege
Miklós út 29-33, 1121, Budapest, braun.ferenc@ek.hun-ren.hu

A LoRaWAN technológia alkalmazása az utóbbi években széleskörűvé vált. A megoldás fizikai rétegét a LoRa modulációs technológia adja. Ez a szűrt spektrumú, alacsony energiaigényű és alacsony adatsebességű kommunikáció kiváló lehetőséget biztosít pont-pont kapcsolat megvalósítására is, ha egyedi protokoll épül rá. Előadásunkban bemutatunk egy pont-pont kapcsolatra készült protokollt, amelyet mára már két környezetben is használnak. Az egyik környezet egy vasútvágasszal és gépészettel sűrűn beépített, több emelet magas színpadi és színpad mögötti terület, amelyen más moduláció illetve protokoll nem volt képes az adatátvitelt megvalósítani. A másik környezetben az aktuátorokat működtető végpont a tenger felszínéhez nagyon közel helyezkedik el, a másik végpont pedig a tengerparton. Ebben az esetben vizsgálnunk kellett a moduláció használhatóságát és hatótávolságát. Bemutatjuk és röviden elemezzük az előzetes mérési eredményeinket, amelyek hazai vizeken születtek, majd ugyanezt tesszük a felhasználás helyén felvett adatsorozattal is.

Kulcsszavak: LoRa, pont-pont kapcsolat, vízfelszíni hullámterjedés, tengeri környezet, vezeték nélküli kommunikáció, nagytávolságú kapcsolat

1 Bevezetés

A megoldandó feladat tengerfelszínen mozgó, nagysebességű objektummal való magas megbízhatóságú kommunikáció. A tengeri jármű a parton elhelyezett állás 3 km-es sugarú körében mozog. A vevőantenna a víz felszínétől csupán néhányszor 10 cm-re van, de az adóantenna árbocra is helyezhető. Az adatforgalomnak kétirányúnak kell lennie, de az adatmennyiség csekély (néhány bájt).

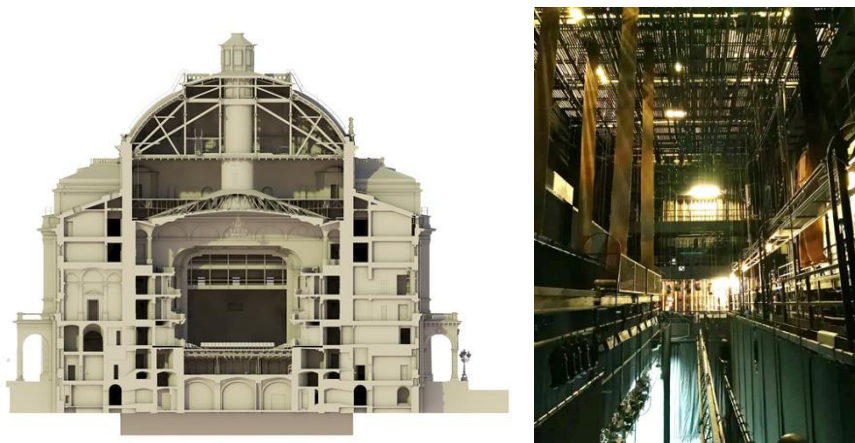
A cikkben nem az elektronikára, illetve a konkrét műszaki megoldásra, azaz az elektronikai, informatikai és mechanikai tervezés bemutatására koncentrálunk, mert ezekkel a témákkal kapcsolatban számos publikáció elérhető. A cikkünkben

főleg a megoldáshoz vezető kísérletsorozatot szeretnénk bemutatni, és egy ajánlást tenni hasonló elrendezés működtetésére annak érdekében, hogy az eredményeink más kutatásokhoz, vagy a mérnöki munkához segítséget adjon

2 Előzmény és háttér

A projekt előzménye egy korábbi feladat, amely színpadi pirotechnikai eszközök rádiófrekvenciás kapcsolattal való működtetése volt nagyon rossz terjedési viszonyok között.

A helyszín az Operaház volt. Az operaház színpadja közel 900 négyzetméteres, belmagassága a színpad vonalában kb. 50 méter. A színpad és környéke tele van fémcsövekkel és lemezekkel: a díszletek, a berendezés, a műszaki területek mind fémvázal rendelkeznek, vagy teljesen fémből vannak. Ezen felül több emeletnyi vasszerkezeten kell átjutnia a rádiófrekvenciás jelnek. Több technológia csődöt mondott, egyedül a LoRa technológia volt az, ami száz százalékos működési biztonságot adott ezek között a körülmények között.



1. ábra

Az Operaház keresztmetszete és zsinórpadrása [1]

2.1 LoRa technológiai összefoglaló

A LoRa egy fizikai rétegbeli rádió átviteli technológia, amelyet a SEMTECH cég fejlesztett ki. Ugyanez a cég gyártja a rádiós chipet, amelyet széles körben használnak. A legelterjedtebb megoldás a technológia alkalmazására a LoRaWAN, ahol a kommunikáció egy gateway-en keresztül történik. A gateway

kommunikál az eszközökkel, demodulálja az üzeneteket, adatot gyűjt, csomagokat állít elő a továbbküldéshez és továbbítja ezeket a csomagokat a hálózati szervernek. Ez az alkalmazás tehát egyfajta IoT rendszert valósít meg. Előnye, hogy több gateway segítségével adott terület lefedettsége könnyen megoldható. Esetünkben ez a megoldás fizikailag nem alkalmazható, ráadásul jelentős költséggel járna.

A másik megoldás a LoRa pont-pont (P2P) kapcsolat, amelyhez nem kell gateway, hanem az egységek egymás között kommunikálnak. Ez természetesen kompromisszumokkal jár, például a címzés hiánya, a biztonsági réteg hiánya vagy az adaptív sebesség (ADR) hiánya. Ugyanakkor olcsón megvalósítható és egyéb infrastruktúrától független kommunikációt tesz lehetővé. Kísérleteinkben és a végleges rendszer kialakításánál is ezt a topológiát követtük.

Európában a LoRa kommunikáció általában az EU868 sávot használja (863-870 MHz), de lehetőség van a 433 MHz-es sáv (EU433) használatára is. Chirp modulációt használ (chirp spread spectrum, CSS), ami nagy (nyílt terepen 5-15 km) hatótávolságot tesz lehetővé, akár részleges rálátás mellett is. A LoRa alapú kommunikáció half duplex átvitelt biztosít.

2.2 Korábbi fellelt kutatások

A feladat megoldása előtt irodalomkutatást végeztünk korábbi, hasonló kísérletek fellelésének reményében. Három lényeges publikációt találtunk:

- Az első kísérlet 2021-ben, trópusi környezetben, vegetációval sűrűn borított víz felszínén történt [2]. A kommunikáció 915 MHz-en zajlott, az antenna magassága 50 cm és 100 cm volt. Ennél a kísérletnél ugyan víz felszíni kommunikációt vizsgáltak, de nem a hatótávolságon volt a hangsúly, így csak 140 méterig teszteltek. Azt akarták kideríteni, hogy a vegetáció mennyire befolyásolja a rádióhullámok terjedését. Azt tapasztalták, hogy a víz felszínéhez közelebb jobb a terjedés.
- A másik publikáció szintén egy 2021-es kutatásról szólt. Itt vízfelszínen volt az adó és a vevő is. Az antennák speciális antennák voltak (háromszög alakú monopól), néhány centiméterre elhelyezve a víz felszíntől. 868 MHz-en folytak a kísérletek, és 160 méter hatótávolságot értek el. A speciális antennák jobb RSSI-t adtak, mint a gyáriak. [3] Esetünkben utóbbi információ mellékes, mert megvásárolható antennákat kell használnunk.
- Egy korábbi, 2018-ból származó publikációban az olvasható, hogy az antennákat néhányszor 10 méter magasságban helyezték el a tengerszint felett, a parton. Két ilyen, egymást tisztán látó, parton elhelyezett antenna között 23-28 km hatótávolságot értek el. Ez messze van az általunk tárgyalt elrendezéstől, tehát nem vehetjük alapul. Tanulság volt még a

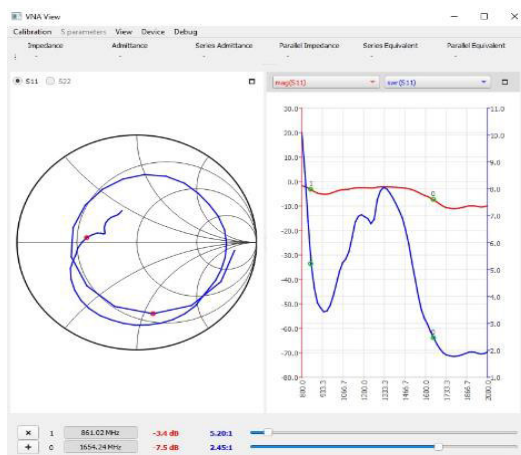
cikkből, hogy 434 MHz-en jobb terjedést értek el. [4] Az általunk alkalmazni kívánt AI50H modul sajnos ezt a frekvenciát nem támogatja, de ha sikertelen lesz a kísérletünk, akkor meg kell fontolni az alacsonyabb frekvenciára való átállást.

A fentiek alapján a felmerült a kérdés, hogy el lehet-e érni stabil átvitelt 3-4 km-es távolságon?

3 Kutatások

3.1 Kezdeti kísérletek

A kutatásainkat Budapesten kezdtük el. Az első vízfelszíni méréseket a Duna Kopaszi-gáttól délre fekvő szakaszán végeztük. Ebben a kísérletben alapvetően azt kellett eldönteni, hogy érdemes-e továbblépni. A kísérlet során a vevőt a vízfelszín közelében tartottuk (10-20 cm), az adót pedig a víz felszínétől számítva körülbelül 1 m magasságban. Sikertelenül próbáltunk 5-6 kilométeres távolságot elérni. Nyilván a teljes reflexiómentességet nem tudtuk megvalósítani, ami azért fontos, mert a LoRa adatátvitel esetén a reflexiók segítik a terjedést, de az látszott, hogy érdemes továbblépni. A kísérletben EK-S76SXB EVK fejlesztőpanelt és ISM-868 antennát használtunk. Az antenna a legolcsóbb, hajlítható könyökkel szerelt antenna volt, típusa nem ismert. 868 MHz-es frekvencián a VSWR értéke 3:1 volt. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a rádió által leadott teljesítménynek csak körülbelül 75%-a jut ki az antennán keresztül, a fennmaradó rész pedig visszaverődik. Az antenna VNA-val mért karakterisztikája az alábbi ábrán látható.

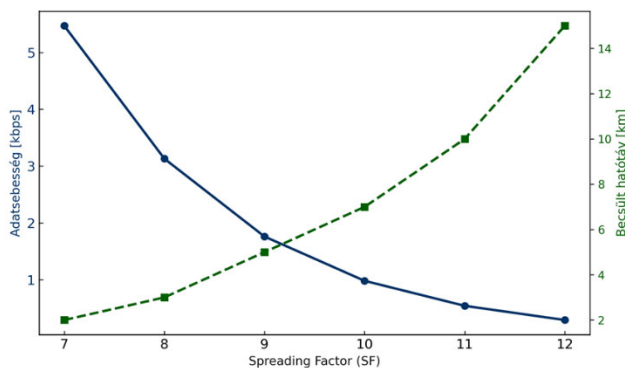


2. ábra Az ISM-868 antenna VNA-val mért karakterisztikája

3.2 Kísérletek a felhasználáshoz hasonló környezetben

A következő kísérletek a Velencei-tó mellett, illetve magán a tavon történtek. Itt már csaknem reflexiómentes környezetben tudtunk vizsgálni. Itt is az előző elrendezést használtuk, de kétféle antennával. egy KERLINK gyári gateway antenna volt (típus: KLK03198).

A gyártói adatlap szerint az antenna 863–876 MHz frekvenciatartományban működik, 50 ohmos impedanciával és félhullámú (half-wave) kialakítással. VSWR értéke $<1.3:1$, maximális nyeresége pedig +3 dBi. A vízben lévő vevőantenna a vízfelszínhez közel helyezkedett el, kb. 30 cm magasságban. A vízparttól távolabbi ideiglenes telepítést egy kenuval oldottuk meg. Az adóval a part több pontjáról végeztünk méréseket. Különféle antennákkal kísérleteztünk illetve többféle SF beállítás mellett is teszteltünk SF7 és SF12 között. Utóbbira azért volt szükség, mert információt akartunk gyűjteni a különböző kiterjesztési tényezők vízfelszíni kommunikációra gyakorolt hatásáról. Az alábbi ábra az SF értékének hatását mutatja az adatsebességre és a hatótávra, szárazföldi körülmények között. Láthatjuk, hogy az SF értéknek növelése az adatsebességet csökkenti, viszont a hatótávolságot növeli. E két paraméter között kellett kompromisszumot találnunk. A következőkben bemutatott mérések során külféle SF beállítások mellett is mértünk, nem csak a helyszín, az antenna és a terep változott.



3. ábra

Az SF paraméter hatása az adatsebességre és a hatótávolságra (szárazföldi körülmények)

A kutatás Velencei-tavi fázisának mérési pontjait mutatja az alábbi ábra. A vevő végig Sukorón volt az evezős pályán, a parttól kb. 120 m távolságra. A parti sáv a mérés idején már átesett a mederrekonstrukciós munkákon, így terméskővel volt terítve a víz és a part találkozása. A parton tereptárgy nem volt, de fás-bokros vegetáció igen. Meglátásunk szerint ilyen körülmények között az adó jelének reflexiója minimális hatással lehetett az átvitel minőségére.

Az adó helyszínei:

- Dinnyés, Sarvajc kilátó. A kilátó 12 méter magas, de az adó körülbelül 5 méter magasan helyezkedett el. Ez az elrendezés közel volt azokhoz a viszonyokhoz, amit a felhasználás helyén terveztek megvalósítani
- Agárdi MOHOSZ kikötő. Itt egészen közel, a part mellé helyeztük el az adót amely körülbelül 1 méter magasságban volt a vízfelszínhez képest. A helyszíneket bemutató képpel ellentétben az antenna a vizsgálat idején természetesen függőlegesen állt.
- Velence, Vitorlás kemping mellett. Innen is sikeres kommunikációs tesztet hajtottunk végre, de ez a teszt inkább abból a szempontból volt fontos, hogy az adó mellett-mögött többemeletes épületek voltak.

Az alábbi, a helyszíneket bemutató ábrán látható, hogy a legnagyobb áthidalat távolság 5,9 km, a legkisebb pedig 3,8 km volt. Tulajdonképpen a specifikáció teljesítéséhez már a 3,8 km-es hatótávolság is elegendő.



4. ábra

A Velencei-tavi mérések helyszínei. Narancssárga csillag: vevő, kék csillagok: adó helyei

A következő ábrák a Velencei-tavi mérések helyszíneit mutatják. Az első képen a kenuban elhelyezett vevő látható (Sukoró).



5. ábra

A vevő elhelyezése

Az adó által bejárt helyszínek közül első a Sarvajc kilátó, a képen éppen a nyereséges KERLINK antennával mértünk.



6. ábra

Az adó a Sarvajc kilátóban

A második helyszínről (Agárd, MOHOSZ kikötő) is közlünk képeket, hogy azonosítható legyen az elhelyezés módja. Az ábrán nem látszik, de az antennát egy műanyag támasz tartotta függőlegesen (balra a tablet a log rögzítéséhez).



7. ábra

Az adó az agárdi MOHOSZ kikötőben

3.2 A kutatások értékelése

A mérési eredményeinkről elmondható, hogy sikeres tesztet hajtottunk végre. A legnagyobb áthidalt távolság csaknem 6 kilométer volt. A mérés során, mint már említettük, logfájlokat készítettünk minden helyszínen és minden SF beállításban. A logfájlok formátuma a mellékelt ábrán látható:

- időbélyeg
- adó RSSI értéke
- vevő RSSI értéke
- SNR érték

Egy fájlrészletet az alábbiakban a hitelesség miatt változatlan formában közlünk annak ellenére, hogy formázási és esztétikai hibákat tartalmaz.


```

18:06:08.083 ^M data: (-116 RSSI (-117) SNR (13)
18:06:08.339 ^M data: (-116 RSSI (-115) SNR (20)
18:06:08.595 ^M data: (-116 RSSI (-117) SNR (13)
18:06:08.866 ^M data: (-116 RSSI (-116) SNR (20)
18:06:09.125 ^M data: (-116 RSSI (-116) SNR (12)
18:06:09.379 ^M data: (-117 RSSI (-116) SNR (15)
18:06:09.650 ^M data: (-116 RSSI (-118) SNR (11)
18:06:09.906 ^M data: (-115 RSSI (-117) SNR (11)
18:06:10.164 ^M data: (-117 RSSI (-117) SNR (11)
18:06:10.433 ^M data: (-115 RSSI (-115) SNR (17)
18:06:10.690 ^M data: (-115 RSSI (-119) SNR (9)
18:06:10.947 ^M data: (-115 RSSI (-116) SNR (14)

```

8. ábra A mérések során készült logfájl szerkezete

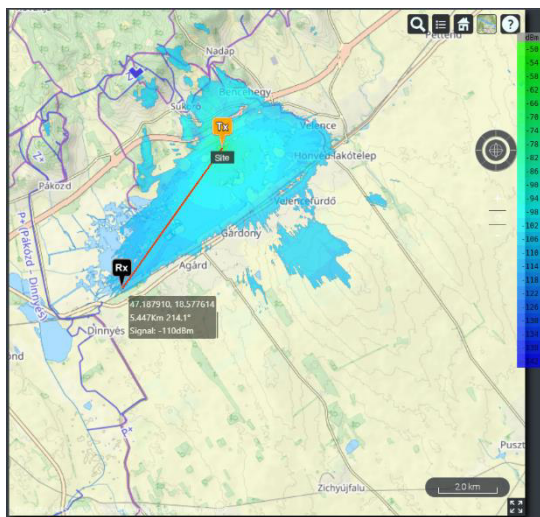
A rögzített adatokat feldolgoztuk és egy átlagolt eredményeket tartalmazó táblázatot alkottunk. Ebben a táblázatban különböző SF beállítások mellett láthatóak az előbbi listában olvasható paraméterek. Az átlagképzésből természetesen kizártuk a mérések elején és végén kapott hibás adatokat. Ezek akkor keletkeztek, amikor a mérés elején és végén az antenna még kézben volt, vagy nem állt még merőlegesen. Az alábbi táblázat a Dinnyési helyszín adatait tartalmazza az olcsó, ISM-868 megjelölésű, hajlítható antennával.

1. táblázat

A dinnyési mérések adatainak összegzése (ISM-868 antennával)

SF beállítás	RSSI 1	RSSI 2	SNR
SF7	-121	-121	-4
SF9	-120	-119	-10
SF10	-125	-120	-1
SF11	-128	-118	-14
SF12	-124	-124	-2

Szimulációt is végeztünk a jelterjedésre a cloudrf.com oldalon, miután a Velencei-tavi mérések megvoltak, majd kiértékeljük azokat. A cél az volt, hogy fel tudjuk mérni azt, hogy a későbbiekben a szimulációra mennyire lehet támaszkodni. Tapasztalataink szerint a szimuláció nagyon jó közelítést ad. Egy szimulációs eredmény az alábbi ábrán látható.



9. ábra

Szimuláció a cloudrf.com oldalon a dinnyési mérésre (KLK03198 antenna)

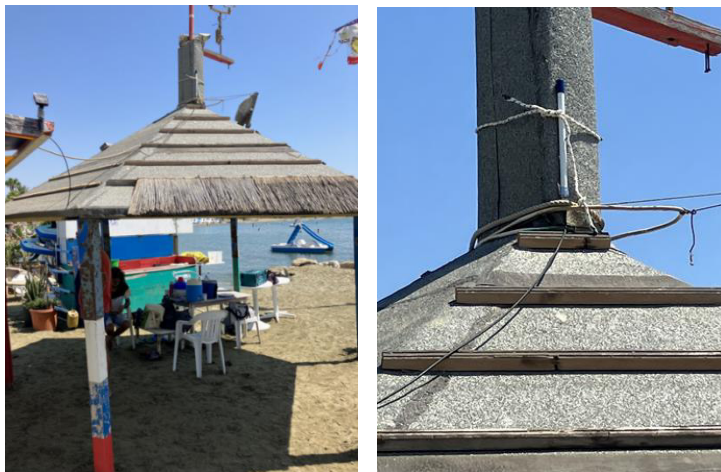
Az eredmények minőségi értékelésénél, tehát annak megállapításánál, hogy a kapott eredmények mennyire felelnek meg a stabil kommunikáció céljára, a gyári ajánlások mellett több publikációt is megvizsgáltunk [5] [6] [7] [8] [9]. Ezek alapján kijelenthető, hogy a kapott értékek a feladat megvalósításához elégségesek.

4. Tesztek a felhasználási helyen

4.1 Prototípus tesztmérések

Ezek után elvégeztettük a prototípus tesztméréseit a tengerparti helyszínen. A mérést a villamos területen közepes mértékben járatos személy végezte, olyan rendszert kellett a kezében adni, ami egyszerű kezelést biztosít. A feladata egy rádiós és egy GPS log készítése volt. Utóbbi a pontos távolság-meghatározáshoz, és a térbeli viszonyok vizsgálata miatt volt fontos. A setup meglehetősen primitív volt, ahogy az az alábbi ábrán is látszik. Az antenna rögzítése például kötéllel történt a kis bódé vasszerkezetének külső burkolatához, ami az alábbi ábrán jól látható. A setup sajnos bizonyos mértékig hibás volt, hiszen a vasszerkezet a burkolat alatti kialakításától függően az antennát elhangolhatja, vagy leárnyékolhatja. A kísérletek ilyen körülmények között csak részben volt sikeres, ráadásul felhasználói hiba miatt bizonyos méréseknél vagy nincs használható

rádiós log, vagy nincs rögzített GPS útvonal. Ennek ellenére azért keletkeztek kiértékelhető eredmények, amelyekről a következőkben írunk.

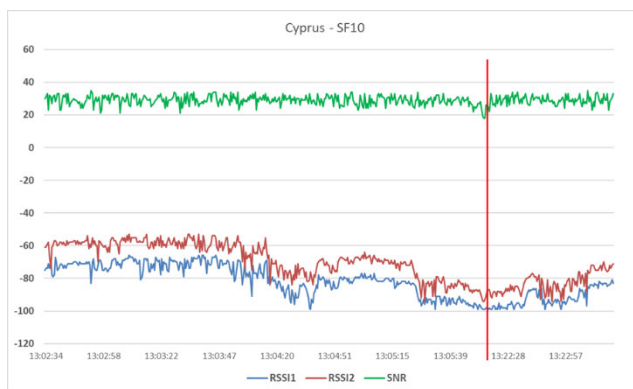


10. ábra

A tengerparti helyszínen az adó antennájának rögzítése és az adó elhelyezkedése

4.2 A prototípus tesztmérések kiértékelése

A következőkben a prototípus tengerparti tesztméréseit értékeljük. Az adóantenna kb. három méter magasan volt, típusa a korábban említett KLK03198 KERLINK gateway antenna. A vevőn lévő antenna ismét az olcsó, ISM-868 jelzésű, hajlítható antenna. A mérés során erős hullámvészesség volt. A mérés során keletkezett logok közül 3 sikerült, az SF11 és az SF12 beállítások melletti mérések rögzítése hibás volt. Az alábbi ábrán SF10 melletti végzett mérés adatait ábrázoltuk az idő függvényében. Az idő a később látható GPS logban is szerepel, így az, hogy a mérési eredmények melyik pozícióról származnak, jól azonosítható.



11. ábra SF10 beállítás mellett mért RSSI és SNR értékek

A késsel ábrázolt adatsor az adó RSSI értéke, a piros karakterisztika a vevő RSSI értékét mutatja, a zöld pedig az SNR-t ábrázolja. A függőleges piros vonal a jelvesztést mutatja. Hiányzó jel esetén szakadás van a karakterisztikákban, a kisebb helyfoglalás miatt ezt a részt kivágtuk az időfüggvényből. A GPS logban az indulás időpontjától, 13:03:08 és 13:10:29 között folyamatos volt a vétel. Ezután jön egy körülbelül 6 perces jelkimaradás. A kimaradás végén a jármű adótól való távolsága 2,3 kilométer volt. A jelkimaradás vélhetően az adóantenna melletti vascső miatt volt, mert minden logban jelentkezett. Miután visszatért a jel, folytonos maradt egészen a jármű visszaérkezéséig (13:25:43). Bár több probléma felmerült, ennek ellenére azt mondhatjuk, hogy a teszt a legszükségesebb adatokat szolgáltatva, így sikeres volt.

Amint azt például egy kifejezetten tengeri környezetben végzett tesztek bemutató publikációban is olvashatjuk, a hatótávolságot erősen befolyásolja a parti egység antennájának a magassága. [10] Minél magasabban elhelyezett parti antennát javasolnak, és bár itt LoRaWAN-ról van szó, de a jelterjedés a mi esetünkben is várhatóan nagyon hasonlóan alakul.



12. ábra Az SF10 beállítással végzett mérés útvonala

5 A végleges eszköz kialakítása

5.1 A hardver

A végleges eszköz hardvere egy AI50H modulon alapszik. Ebben egy ARM CORTEX M4 processzort integráltak, ami egy 32 bites, 48 MHz-es processzor. A rádiós oldal az SX126x127x-es chipre épül, amely az ISM868 sávban képes működni.

A konfigurálás során a következő paraméterek lettek beállítva:

- frekvencia: 868 MHz
- RF teljesítmény: +21 dBm (125 mW)
- érzékenység: -138 dBm
- sávszélesség: 125 kHz
- kiterjesztés: SF12

- $CR = 4/5$
- preamble = 8
- IQ = normál
- payload hossza: 4 bájt
- bitsebesség: kb. 300 bit/s

5.2 A firmware

A végleges eszköz kommunikációs folyamatát mutatja az alábbi ábra



13. ábra A végleges eszköz kommunikációs folyamata

Az eszközök kommunikációja 3 féle lehet:

- **Párosítás**: a vezérlő egység bekapcsolás után párosítást kér a távoli egységtől. Ha a távoli (vevő) egység párosítás üzemmódban van, válaszol. Ezt az egyszerű folyamatot csak az első hozzárendelésnél kell megcsinálni. Ha a távoli egység a párosítást visszaigazolja, a vezérlőegység beteszi egy listába, ahonnan a későbbiek során elérhetjük.
- **Normál működés**: egy időzített státuszlekérdezés történik akkor is, hogyha nincsen parancsküldés a távoli egység felé. Ez a lekérdezés kb. 30 másodpercenként zajlik le. Válaszként a státusz érkezik, amely tartalmazza az akkumulátor feszültséget, valamint az RSSI és SNR értéket. A teljes tétlenségi időtartam alatt ez a folyamat zajlik ciklikusan
- **Vezérlés**: engedélyezés vagy tiltás parancs kiadása történik, amely erre válaszol (ACK). A vezérlést a későbbiekben ismertetjük.

Az adatsomag felépítése háromféle lehet:

1. Kimenő parancsbájt a mestertől az eszköz felé

- TX cím: 3 bites, a mester saját rádiós azonosítója
- Cél ID: 2 bites, a kiválasztott távoli eszköz azonosítója (0...3)
- Parancs: 3-bites, a végrehajtandó művelet kódját tartalmazza:
 - 010: státuszkérés
 - 10x: átkapcsolás (x = 0: engedélyezés, x = 1: tiltás)

TX cím	Cél ID	Parancs
---------------	---------------	----------------

14. ábra Kimenő parancsbáj (mestertől az eszköz felé)

2. Adatsomag az eszköztől a mester felé (2 bájt)

- TX cím: 3-bites a válasz forrásának rádiós címe
- Eszköz ID: 2 bites, a távoli egység azonosítása
- Státuszjelző: 1 bites, a csomagtípust jelzi
- Akkumulátor szint: 2 biten adja vissza a töltöttségi állapotot
- RSSI: az eszköztől a mester felé a jelerősség szintje 2 biten
- SNR: jel-zaj arány értéke 2 biten
- Eszköz állapot 4 biten a futó állapotkódot adja vissza, pl.: 0x08 – használatban, 0x0C – blokkolva

TX cím	Eszköz ID	Státusz jelző	Akkumulátor szint
RSSI	SNR	Eszköz állapot	

15. ábra Adatsomag az eszköztől a mester felé

3. A válasz ACK bájtja az eszköztől a mester felé

- TX cím: 3 biten meghatározza a küldő eszköz címét
- Eszköz ID: 2 bites, a válaszadó azonosítóját tartalmazza
- ACK: 3-bites, ACK jelzés az adó felé

TX cím	Eszköz ID	ACK
---------------	------------------	------------

16. ábra A válasz ACK bájtja

Összefoglalás

Kutatásaink eredményei szerint a nagytávolságú ($d \geq 3$ km) adatátvitel vízfelszíni RF terjedés esetén is megvalósítható LoRa P2P (pont-pont) kapcsolattal. Ezt a végleges, helyesen telepített rendszer igazolja. A javasolt topológia: az 1. (adó) antenna árbocon, legalább 3 m-en elhelyezve, a 2. (vevő) antenna a vízfelszínhez közel is lehet ($n \times 10$ cm). Mindkét antennánál javasolt nyereséges antenna használata. Javasolt rádiós beállítások: RF kimenő teljesítmény: +21 dBm, SF12. Az általunk elkészített rendszerben az adási teljesítmény (ISM határérték +24 dBm EIRP) és az adás időkitöltése (maximum: átlag 1% kitöltés) szabályának sértése nem történik.

További kutatásokat kell végezni más megengedett sávban (ISM433), itt kedvezőbb terjedés várható, de az alkalmazott AI50H modul erre a sávra nem alkalmas. További teszteredmények szükségesek irányított adóantenna mellett, amellyel valószínűleg jelentős távolság-növekedés érhető el.

Források

- [1] Magyar Állami Operaház felújítása, <https://zda.hu/hu/zda-project/magyar-allami-operahaz-felujitasa/> (letöltve 2025. 10. 26.)
- [2] A. Gutiérrez-Gómez, V. Rangel, R. M. Edwards, J. G. Davis, R. Aquino, J. López-De la Cruz, O. Mendoza-Cano, M. Lopez-Guerrero and Y. Geng, “A Propagation Study of LoRa P2P Links for IoT Applications: The Case of Near-Surface Measurements over Semitropical Rivers,” *Sensors*, vol. 21, no. 20, p. 6872, Oct. 2021, doi: 10.3390/s21206872
- [3] A. Dala and T. Arslan, “Design, Implementation, and Measurement Procedure of Underwater and Water Surface Antenna for LoRa Communication,” *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1337, Feb. 2021, doi: 10.3390/s21041337
- [4] M. Centenaro, A. Vangelista, F. M. Ronga and M. Zanella, “Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Case of LoRa™ in the IoT,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 2853, Sept. 2018, doi: 10.3390/s18092853
- [5] W. Xu et al., “Measurement, Characterization, and Modeling of LoRa Technology in Multifloor Buildings,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 298–310, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2946900
- [6] S. Demetri et al., “Automated Estimation of Link Quality for LoRa: A Remote Sensing Approach,” in *Proc. 18th ACM/IEEE Int. Conf. Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 145–156, doi: 10.1145/3302506.3310396

- [7] A. E. Ferreira et al., “A Study of the LoRa Signal Propagation in Forest, Urban, and Suburban Environments,” *Annals of Telecommunications*, vol. 75, pp. 333–351, 2020
- [8] K. Peppas, “New Results for the Error Rate Performance of LoRa Systems,” *Sensors*, vol. 22, no. 9, p. 3350, 2022, doi: 10.3390/s22093350
- [9] C. F. Dias, E. R. de Lima and G. Fraidenraich, “Bit Error Rate Closed-Form Expressions for LoRa Systems under Nakagami and Rice Fading Channels,” *Sensors*, vol. 19, no. 20, p. 4412, 2019, doi: 10.3390/s19204412
- [10] S. Pensieri et al., “Evaluating LoRaWAN Connectivity in a Marine Scenario,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 11, p. 1218, 2021, doi: 10.3390/jmse9111218