

**KTDK dolgozat-Légköri jelenségek
vizsgálata rádióhullám-idő
referenciajelek alapján**

November 2023

Körtvélyessy Lóránt,

Konzulens: Dr. Horváth Bálint, adjunktus BME

Contents

1	Bevezetés	3
2	Introduction	3
3	Hullámterjedés	4
3.1	Internet	4
3.2	Rádiós kommunikáció	5
3.3	Magasfrekvenciás hullámok	6
3.4	Alacsonfrekvenciás hullámok	6
4	Hullámok terjedését befolyásoló tényezők	7
4.1	Légnyomás	7
4.2	Nedvesség	7
4.3	Besugárzás	8
4.4	Viharok, villámlás	8
4.5	Mesterséges tényezők	8
5	Ionoszféra	8
5.1	Kialakulása	8
5.2	Rétegződés	9
6	Koncepció	10
7	DCF77	11
7.1	AM kódolás	12
7.2	Az időközlés nehézségei	12
7.3	A DCF77 vétele	13
8	A mérés	15
8.1	Koncepció	15
8.2	University of Twente: Wide-band WebSDR	15
8.3	Adatgyűjtés	16
8.3.1	Jelfeldolgozás	16
8.3.2	Időjárás kigyűjtés	17
8.4	Elemzés	18
9	Összegzés	19
10	Felhasználás	20
11	Források	21
11.1	Szöveganyag és cikkek	21
11.2	Képanyag	22
11.3	Közreműködték	22

1 Bevezetés

Napjainkban számos eszköz használja a rádióhullámokkal sugárzott idő-referencia jeleket, egyebek mellett például az automata órák, az időzített utcai világítás, vagy a villanyórák. Feltalálása óta a rádiótechnika sokat fejlődött, de megbízhatósága máig nem makulátlan. Tapasztalható például, hogy viharos időben szakadozik rádió, az internet. Biztos tehát, hogy a terjedő hullámokra az időjárás hatást gyakorol. Ez a probléma a vezetékes adatközlés, illetve a hatékonyabb hibaszűrés és jelfeldolgozás miatt egyre inkább lényegét veszti.

Izgalmas lehet azonban a jelenségre fordítva tekinteni, és a torzított adásból, mintákat keresve visszakövetkeztetni az azt érő időjárási viszontagságokra.

A jelen kutatás célja ezen jelek, légköri jelenségek, például a légkör alsó rétegének napszaktól függő megjelenése és eltűnése, tanulmányozásához való használhatóságának vizsgálata az ionoszféra rétegeiről visszaverődő rádióhullámok alapján. Az idő-referencia jelek vétele és elemzése megvalósítható egy megfelelő tekercsel, mely rádióként funkcionál és egy hangkártyával vagy szoftver rádióval, illetve a GNU Radio szoftver használatával.

Munkám során a méréshez a DCF77 hosszúhullámú német rádióadást használjuk, mely középeurópai időt (UTC +1) sugároz Frankfurtból megszakítás nélkül és egészen Gibraltárig fogható.

Jelen dokumentumban bemutatásra kerülnek a légköri jelenségek rádióhullámokra való különféle hatásai, több esetben mérési adatokkal alátámasztva, illetve ezen hatások kiküszöbölési lehetőségei, és néhány felhasználási terület. Kitérek egy-két gyakorlatban használt rádiózási módszerre, ezek előnyeire, hátrányaira, bővebben részletezve a DCF77 rendszert is.

2 Introduction

In our times, many devices use radio waves to transmit time reference signals, including automatic clocks, timed street lighting, and electric meters, among others. Since its invention, radio technology has evolved significantly, but its reliability is still not flawless. For example, it can be observed that radio and the internet may experience interruptions during stormy weather. It is certain, therefore, that weather affects the propagation of waves. However, this problem is becoming less significant due to wired data transmission and more efficient error correction and signal processing.

It can be exciting to look at this phenomenon from a different perspective and try to infer the weather conditions that affect distorted transmissions by searching for patterns in them. The aim of the research is to examine the usability of these signals for studying atmospheric phenomena, such as the appearance and disappearance of the lower atmospheric layers depending on the time of day, based on radio waves reflected from the ionospheric layers. Receiving and analyzing time reference signals can be achieved using suitable equipment, which functions as a radio and includes a sound card or software-defined radio, along with the use of GNU Radio software.

In this work, we use the DCF77 long-wave German radio broadcast for measurements, which continuously transmits Central European Time (UTC +1) from Frankfurt to Gibraltar without interruption.

In this document, the various effects of atmospheric phenomena on radio waves are presented, in several cases supported by measurement data, as well as the possibilities of eliminating these effects, and some areas of application. I will discuss one or two practical radio methods, their advantages and disadvantages, detailing the DCF77 system in more detail.

3 Hullámterjedés

Napjainkban a rádiós kommunikáció, az internet mellett, elengedhetetlen adat-továbbító eszközök. Ezek nélkül társadalmunk, ha nem is omlana össze, de jelentős problémákkal kellene szembenéznie.

3.1 Internet

Az internet esetében a kétirányú kommunikáció miatt, nagyon fontos szempont a gyorsaság. A szárazföldön, hogy minimalizálják a sugár által megtett távokat, gyakori átjátszótoronyokat alkalmaznak, hogy a közlekedő hullámok minél inkább "rásimuljanak" a föld felszínére. Azonban ha utunkba akad egy óceán, sajnos nem tudunk a megszokott átjátszókkal operálni. Két kontinens közötti távolságot ugyan át lehetne hidalni rádiójelekkel, (akár alacsony, akár magas frekvenciás jelek és műholdak használatával), de ezek lassúak lennének az azonnali válaszidőhöz. Ezért ha videóhívást indítunk mondjuk Amerikába, vagy Ausztráliába, az üzenet kezdetben állomásról állomásra megy amíg csak megteheti. Aztán, ahogy a szárazföldnek végeszakad, az adat vízalatti kábeleken keresztül fog futni tovább (lásd: Figure 1), egészen a túlpartig, ahonnan ismét az átjátszótoronyoké a főszerep.

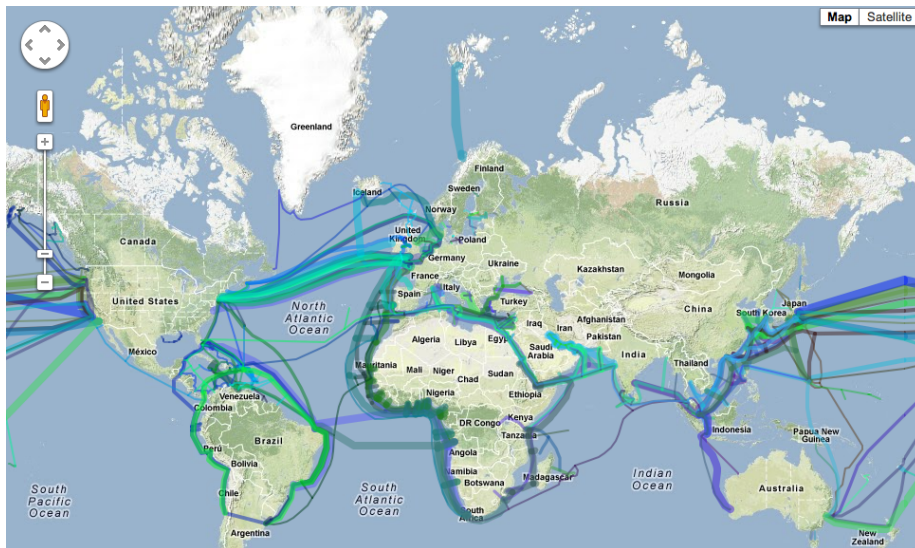


Figure 1: Az óceánok mélyén futó internet-kábelek

Az internet nagy hátránya, hogy olyan helyeken, ahol nincsenek toronyok kiépítve, nem tudunk rákapcsolódni, vagy ha mégis, és műholdas internetet használunk, az üzenet nagy utazási ideje miatt (feljut a műholdig, ami valószínűleg geostacionárius pályán kering, ez több mint 35 786 km-t jelent oda, és még ennyit vissza.) a válaszidő nem lesz gyors. Erre kínál majd hamarosan megoldást a Starlink-rendszer, ami rengeteg alacsony föld körüli pályán keringő műholdból épül fel, amik hálózatként működve megosztják és ezáltal továbbítják a felküldött adatokat egymással, így a föld szó szerint bármely pontjáról tudunk majd internetezni, olyan sebességgel, ami megközelíti az adótoronyok és kábelek gyorsaságát.

3.2 Rádiós kommunikáció

Visszatérve a rádiós kommunikációra, alapvetően a rádiójel az elektromágneses hullámtartomány egy része. A különböző rádió-frekvenciák, és ipari vagy kutatási felhasználásuk nagy spektrumot ölel fel, kezdve a 3-30 Hz-es (ELF) tartománnyal, amit a meteorológiai kutatásokban használnak, egészen a 120 THz tartományig, ahol a távközlés (hosszútávú kommunikáció) és az adatátvitel zajlik.

Gyakorlati szempontból két fajta hullámtartományt érdemes megkülönböztetni, a magasfrekvenciás hullámokat és az alacsonfrekvenciás hullámokat.

3.3 Magasfrekvenciás hullámok

A magasfrekvenciás hullámok hullámhossza kicsi. Első tagjuk a HF (High Frequency) más néven Rövidhullám, hossza maximum 100 m lehet. Utolsó tagjuk, az EHF (Extremely High Frequency), a Milliméteres hullám, nevéből adódóan milliméteres nagyságrendű.

A kisebb frekvencia nagyobb energiát jelent. Emiatt működik például a mikrohullámú sütő, ami mikrométer nagyságrendű sugarakkal bombázza az ételt, ami az átadott energiától felmelegszik. Ugyanakkor ennek a tulajdonságnak az áthatoló- képesség látja kárát.

A magasfrekvenciás hullámokat minden olyan objektum elnyeli vagy visszaveri, aminek kiterjedése összemérhető azok méretével. Épp ezért a rövid hullámok nem tudnak áthatolni falakon, vagy nagyobb testeken, az ionoszférán viszont igen (lásd: Figure 2). Ennek köszönhetően tudunk kommunikálni az űrhajósokkal, és a távközlési műholdakkal, amik visszatükrözik az adást, ezzel reflektálva azt, és kikerülve a föld görbületét. Amiatt, hogy a kis dolgokkal is interaktálnak praktikus módon kicsi antennával is lehet őket fogni (Például a Wifi router "karjai" is ilyen vevők).

3.4 Alacsonfrekvenciás hullámok

Az alacsonfrekvenciás hullámok egészen hosszúak. Az általuk lefedett tartomány az ELF-től (Extremely Low Frequency) tart egészen az LF-ig (Low Frequency), ami 100.000 km-től 1 km-ig tartó intervallumot jelent.

Ezeknek a hullámoknak nagyon jó az áthatolóképesége (lásd: Figure 2), mivel egy 10 km-es hullámot jelentős mértékben csak 10 km-es objektumok tudnak torzítani. Viszont ehhez tartozik az is, hogy egy legkisebb nagyjából 2500 méteres antenna kell ahhoz, hogy érdemben fogni lehessen ezeket. Problémákat okozhat az alkalmazásban, ha ekkora adóra és vevőre van szükség. Bár mindkettőt fel lehet "tekerceselni" (egy vasmag köré tekert vezető is lehet antenna, hiszen az elektromágneses hullámok hatására feszültség indukálódik benne), de ha nagy méreteket szeretnénk áthidalni ezzel a módszerrel, akkor annak a jelerősség, és pontosság látja majd kárát, illetve más frekvenciák is bezavarhatnak, hiszen ahogy egyre szorosabb a csévézés, az antenna egyre inkább fog úgy működni, mint egy kisebb antenna.

De a legizgalmasabb dolog, amire az alacsonyfrekvenciájú hullámok képesek, az az, hogy vissza tudnak "pattani" az ionoszféráról és a talajról. Ez a "visszapattanás" azt jelenti, hogy a hullámokat a föld, a felhők és főképp az ionosféra képesek elnyelni, majd idővel visszasugározni (lásd: Figure 2). A jelenség már csak azért is jelentékeny, mert ezt az effektust kihasználva úgy tudunk a Föld görbülete által eltakart területekkel kapcsolatot teremteni, hogy nem használunk fel sem műholdat, sem bármilyen más átjátszó eszközt. Természetesen a visszasugárzás során a hullám veszít az energiájából, így egyre inkább gyengülni fog, mígnem kimutathatatlan lesz. Ezért sajnos kellő energiájú rádióadás nélkül nem lehet az egész bolygót lefedni.

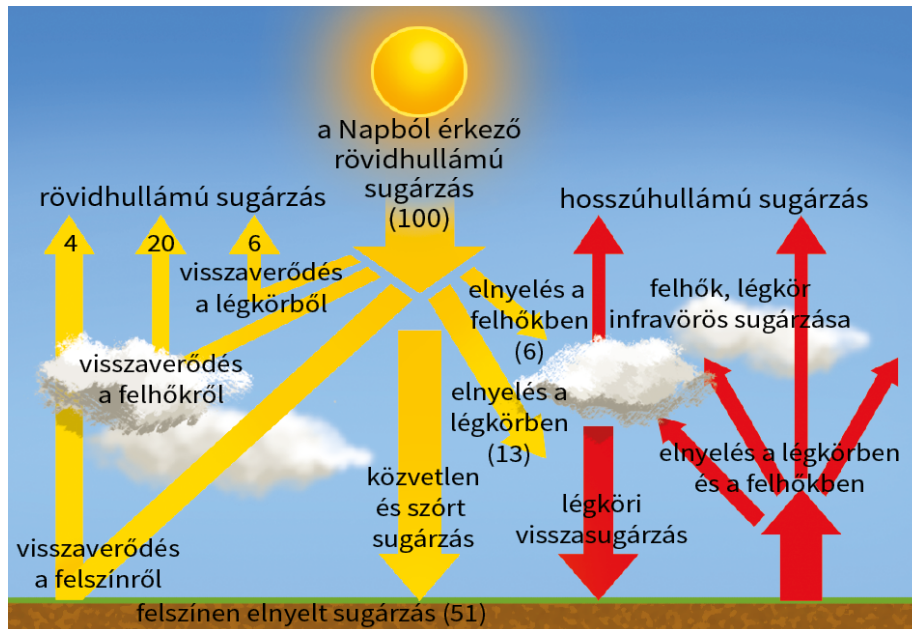


Figure 2: Hosszú- és rövidhullámú sugárzás, és a velük lejátszódó jelenségek a légkörben

4 Hullámok terjedését befolyásoló tényezők

4.1 Légnymomás

A levegő légnymása, mivel minél sűrűbb a közvetítő közeg, annál inkább fennáll annak a lehetősége, hogy zavarja a terjedő hullámokat. Minden hullámra igaz, hogy a hullámhosszával összemérhető kiterjedésű dolgok képesek benne zavart kelteni. Egy wifi jel esetében (2,5 GHz és 5 GHz közé esik, ami UHF és SHF tartomány, nagyjából 10 centiméter hosszú) például már egy szék is kisebb zavart okozhat. Egyebek mellett ezért sem célszerű például a routert a szekrényben tartani. A hullámhossz növekedésével a jelenség egyre inkább elhanyagolhatóvá válik. A hosszúhullám (LF tartomány) ami 30 és 300kHz között van, már 1 és 10 kilométer közötti hosszal rendelkezik, így ebben az esetben az épületek, mesterséges dolgok és más hasonló tényezők alig jelentenek problémát.

4.2 Nedvesség

A páratartalom is fontos faktor, hiszen megint csak arról beszélünk, hogy a levegő víztartalmának növekedésével annak össz sűrűsége is nő, ezért egyre közelebb kerül a szilárd anyaghoz. Ugyanúgy, mint az előző esetben, ennek az értéknek a növekedése is a hullám terjedésének romlását okozza.

4.3 Besugárzás

A hőmérséklet és a napsütés, az előző kettővel áll nagyon szoros kapcsolatban. Ha a levegő felmelegszik kitágul, és a sűrűsége csökken, ugyanígy a benne lévő nedvességet is elkezd leadni. A nappal és éjszaka váltakozásával azonban még egy fontos dolog változik, az ionoszférára, ami szintén komoly kihatással van a földet ért besugárzás.

4.4 Viharok, villámlás

Az összes légköri kisülés elektromágneses interferenciát okoz, ezzel torzíthatja a rádióhullámok terjedését. Míg a villám maga inkább lokális, addig az elektromosan töltött felhők nagy területet fednek le, és így sokkal nagyobb valószínűséggel fognak érintkezni a terjedő hullámokkal. Ha azonban egy villám keresztezi a haladó rádióadás útját, az a nagyobb feszültség miatt nagyobb elektromágneses teret, és ezáltal nagyobb torzulást is okoz.

4.5 Mesterséges tényezők

A településklíma és városklíma sem elhanyagolható. A napsugárzás a városok felett 15-20%-al alacsonyabb, mint annak környezetében, minek okozója a városok erősen szennyezett levegője, a korom és porszemcsék több napsugarat nyelnek el. Épp ezért a városi hőmérséklet magasabb a környezeténél.

A városi szmog, az üvegházhatást illetve a levegő sűrűségét is befolyásolja. Mindkét tényező a hullámok elnyelődését, reflektációját vagy visszaverődését okozhatja.

5 Ionosféra

5.1 Kialakulása

A légkör alapvetően szigetelőként viselkedik, mert nem jönnek létre benne rendezetten mozgó elektronok, így nem is válhat klasszikus értelemben vett vezetővé. Létezik azonban az úgynevezett ionáram, ami a töltéssel rendelkező részecskék, vagyis az ionok, rendezett mozgását jelenti. Ilyen módon a légkör is lehet vezető, ha megnövekszik benne az ionkoncentráció.

A levegőt alkotó molekulák ionizációját (Az ionizációt lásd: Figur 3) számtalan dolog előidézhetheti, például az űrből érkező erős elektromágneses- és részecskesugárzás, illetve a talajban vagy a légkörben bomló radioaktív anyagok, de legfőképp a naptól érkező erősen ionizáló hullámok. Azt, hogy a levegő mikor válik vezetővé, ugyancsak annak hőmérséklete, páratartalma és nyomása határozza meg. Nagy szerepet játszik itt is a légszennyező anyagok jelenléte. Azt a réteget ahol a levegő ionizálódik, és egy vezető réteget képez, ionoszférának nevezzük.

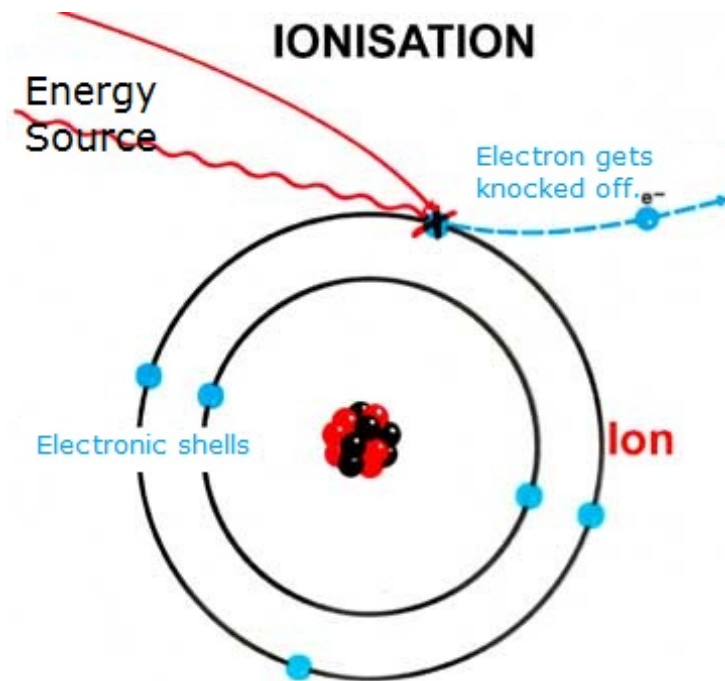


Figure 3: Az ionizáció folyamata. A szükséges energiát esetünkben az űrből és a naptól érkező sugárzás szolgáltatja.

5.2 Rétegződés

A földkéregtől távolodva a levegő egyre ritkább, az egységnyi térfogatra jutó részecskék száma exponenciálisan kevesebb lesz, ezzel együtt azonban azok egyenként a naptól és az űrből érkező sugárzásnak is jobban ki lesznek téve.

Az ionok akkor válnak ismét semlegesé, mikor egy ellentétesen töltött részecskével ütköznek, ezért az egységnyi térfogatra jutó részecskeszám csökkenésével az ionok élettartama is növekedni fog, mivel találkozásuk valószínűsége a koncentrációval együtt lesz egyre kisebb. Az alacsonyabb légrétegekben az ütközés és az ezzel járó töltésvesztés, más néven rekombináció gyakoribb.

Az ionoszférát 5 fő rétegre lehet bontani (lásd: Figure 4), ezek B, C, D, E, F. Mint ahogy fentebb említettem, a szférákat legnagyobb részben a nap ionizáló sugárzása hozza létre. Ennek megfelelően a nem kellően stabil rétegek folyamatos ionizáció nélkül gyengülhetnek, vagy akár teljesen el is tűnhetnek. A 40 és 90 km közötti B, C és D rétegek estére rendszerint leépülnek, az E réteg pedig jelentősen gyengül, olykor el is tűnik teljesen. Az ionoszféra legstabilabb rétege az F-övezet, ami 90 és 140 km között helyezkedik el, és állandónak mondható.

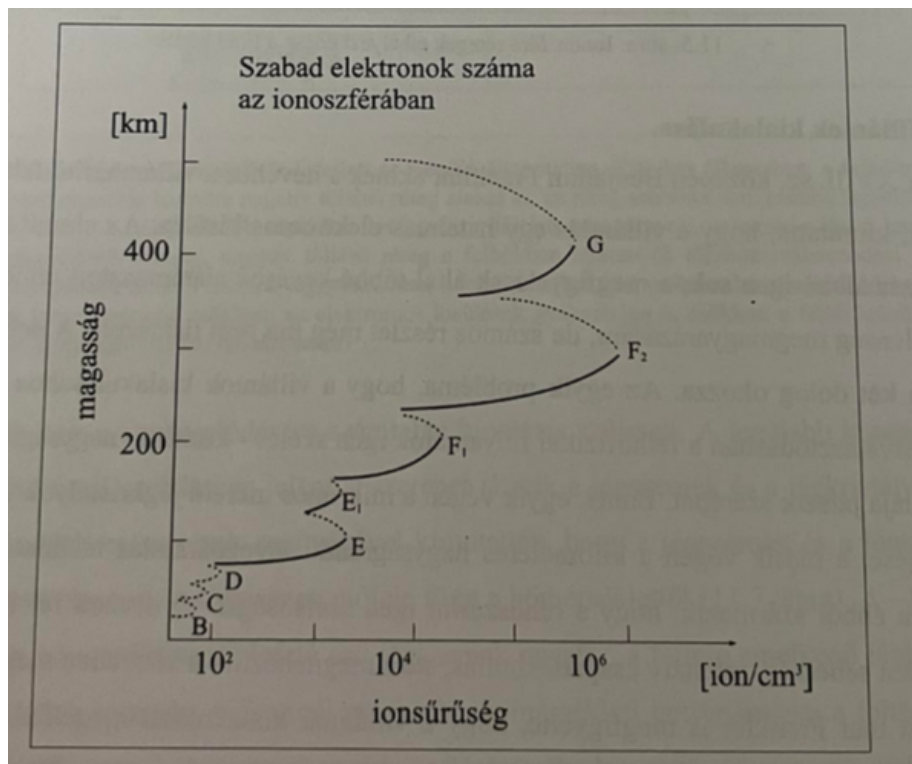


Figure 4: Az ionoszféra övezetei és alövezetei, az ionsűrűség és a magasság függvényében.

6 Konceptió

Mint azt már fent, a bevezetésben írtam, a kutatás célja tehát hogy összefüggést találjunk egy választott rádióadást ért hatások, a légkör összetétele és az időjárás viszontagságai között. Ehhez a feladathoz először is egy megfelelő hullámhossz kell találni, hogy lehetőséget teremtsünk a méréshez.

A megfelelő frekvencia kiválasztásánál a következő faktorokat kellett figyelembe venni:

1. A jelnek mindenképp elég erősnek kell lennie, ahhoz, hogy átfogó elemzéssel kellő pontosságú adatokat lehessen belőle levonni. Ennek a megőrzése érdekében fontos, hogy egy nagyteljesítményű adóból érkező jelet használjunk, ami nem "utazott" még elég sokat ahhoz, hogy túlságosan legyengüljön.
2. Nagyon fontos szempont, ami az előzőekkel szembe megy, hogy a hullámnak eleget kell utazni ahhoz, hogy az időjárási elemek kellő mértékben tudják torzítani, ezáltal a változás kimutatható legyen.

3. A távolság miatt az adásnak hosszúhullámú sugárzásnak kell lennie, hogy a föld görbülete ne okozzon problémát, ám elég rövidnek is kell maradnia ahhoz, hogy az időjárási körülmények befolyásolni tudják (Egy 100 km hullámhosszó jelet például nagyon nem befolyásol semmi, illetve a vétele is nehézkes).

Természetesen ilyen hullámot magunknak nem tudtunk volna előállítani, tekintve, hogy nem rendelkezünk kellően nagy adóval, és nagyteljesítményű rádiótechnikai eszközökkel sem. Illetve a távolság sem adott. Tehát keresni kellett egy olyan már létező adást, ami a kritériumoknak megfelel és fel tudunk használni a mérésekhez.

Végül a német DCF77 atomidő-szinkronjeladóra esett a választás, ami minden pontot kellően kielégít.

7 DCF77

A DCF77 (A hívójel feloldása: D: Deutscher; C: Langwellensender; F: Frankfurt; 77: mert 77.5 kHz a jel frekvenciája) lényegében egy pontos-idő szolgáltatás, amit a Frankfurttól 25 km-re, délkeletre fekvő Mainflingenből null-24 sugároznak. A DCF77 hullámhossza körülbelül 3871 m, ami az LF (Low Frequency) tartományban helyezkedik el. Az adó egyperces szakaszokat bocsát ki, amik AM kódolással másodpercekre lebontva különböző információkat tartalmaznak. A Mainflingeni rádióállomás (lásd: Figur 5) 1978 óta üzemel, és Németország Nemzeti Metrológiai Intézete (Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)) üzemelteti és tartja karban.



Figure 5: A képen látható oszlopok egy "kábelgyűrűt" tartanak, ami maga az antenna. Adott hullámhosszú rádióhullámot vele összemérhető nagyságú antenna képes sugározni, ezért nagy antennára van szükség.

7.1 AM kódolás

Az AM (amplitúdómoduláció) kódolás egy olyan, rádiós kommunikációnál használt módszer, aminél az információt a hordozó hullám, más néven vivőjel, amplitúdójának változtatásának segítségével tömörítjük bele az adásba. A gyakorlatban leginkább hang vagy videó továbbításra használjuk ezt a fajta jelátvitelt. Az amplitúdó, nulla és a maximum között fog ingadozni (lásd: Figur 6). Az amplitúdómodulációnál az eltérés mértékét százalékban szokás megadni.

A Morzeadásnál például, ha nincs moduláció, vagyis a jel nulla, akkor az értéke is 0%. Minden egyéb esetben, tehát ha a modulációs csúcs a null érték és a maximum között van, az értéke 100%. Ezzel a módszerrel bináris üzeneteket lehet létrehozni.

Természetesen nem csak ez az egyetlen módszer, az amplitúdómodulált jelek létrehozására és visszafejtésére, sok különböző konfiguráció létezik nem csak a morzejel (lásd: 6). Az AM mellett még számtalan moduláció- típus létezik, például a frekvenciamoduláció, a fázismoduláció, vagy a szigma-delta moduláció.

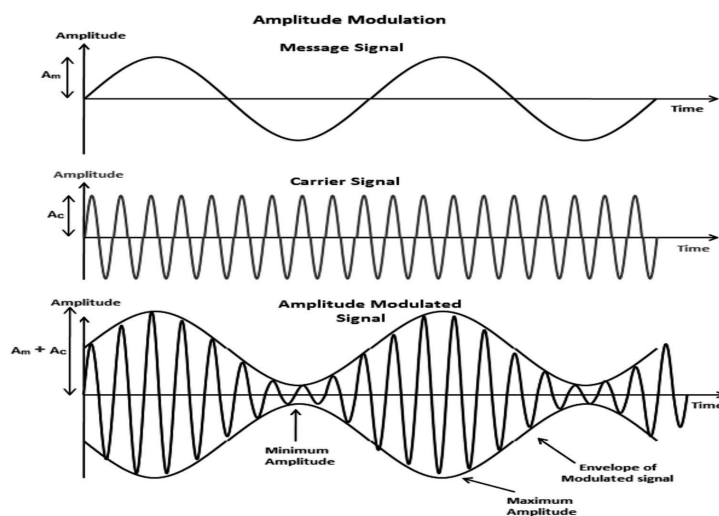


Figure 6: Fentről lefelé: a kódolni kívánt jel, a vivőjel és az amplitúdómodulált adás

7.2 Az időközlés nehézségei

Modern világunk működéséhez a pontos és összehangolt idő elengedhetetlen. Nagyon fontos szerepe van a közlekedésben, főleg a légi közlekedésben, a modern tőzsde és a pénzügyi tranzakciók működésében, illetve a GPS rendszerekben is. Manapság az idő precizitását (legtöbbször céziumot használó) atomórák biztosítják. Ezek az eszközök azonban nem elég felhasználóbarátak ahhoz, hogy a kezünkön az akatáskánkban, vagy a repülőkön használjuk őket, sokkal praktikusabb, ha olyan központokat létesítünk, amiknek dedikált feladatuk, hogy a

pontos időt meghatározzák, és azt minden pillanatban megosszák velünk, leggyorsabban rádiójel formájában.

A GPS (Global Positioning System) műholdak mindegyike rendelkezik egy fedélzeti atomórával. Amikor lekérjük a helyzetünket, akkor azok a műholdak, amiknek a látómezejében tartózkodunk elküldik nekünk egyszerre a pontos idejüket. Amíg a jel eljut oda, majd visszaér hozzánk az idő telik, és ennek a delatációnak a segítségével képes a GPS-jeladó kiszámolni, hogy milyen messze vagyunk egyenként a műholdaktól, és háromszögeléssel, hogy a Földgolyón hol tartózkodunk pontosan. GPS-jeladó segítségével ugyan a pontos időt meg lehet mondani, de ha belegondolunk, hogy ehhez minimum három műhold erőforrásait és a vevőben található jelfeldolgozó egység nem jelentéktelen számítási kapacitását használtuk, bizonyára felmerül a kérdés, hogy mennyire hatékony ez, illetve hogy van e alternatíva. Nem mellesleg egy GPS-jeladó költséges és nem is kellően apró ahhoz, hogy például, egy kvarcórába minden gond nélkül implementálni lehessen.

7.3 A DCF77 vétele

Az előzőekben keresett alternatíva régóta rendelkezésre áll a DCF77 formájában. Számtalan elektronikai eszköz, amit nap mint nap használunk, rendelkezik vevővel. Egy DCF77 vevő kicsi (lásd: Figure 7), olcsó, megbízható, és a vett jel segítségével az idő, a nap, hónap, év, a speciális események, mint az óraátállítás vagy a szökőmásodperc mind könnyedén kezelhetők. A DCF77 szinte mindenhol ott van, kezdve a kvarc karórákkal, az automata faliórákon át, az utcai világításon keresztül egészen a különböző szerverekig és hálózatokig, a meteorológiai állomásokról már nem is beszélve. A rendszer vészhelyzet esetén bevethető a lakosság figyelmeztetésére is.

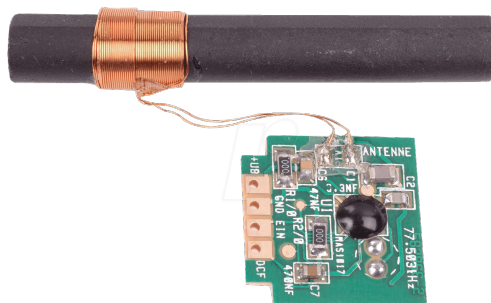


Figure 7: A DCF77 jelfeldolgozó és antenna. Utóbbi egy vasmag köré tekercselt rézdrót köteg. A vasmag felerősíti az elektromágneses indukciót, amit a rádióhullámok okoznak. A viszonyítás kedvéért a jelfeldolgozó körülbelül tízforintos méretű.

A vett egyperces AM szekvencia a következőképpen épül fel:

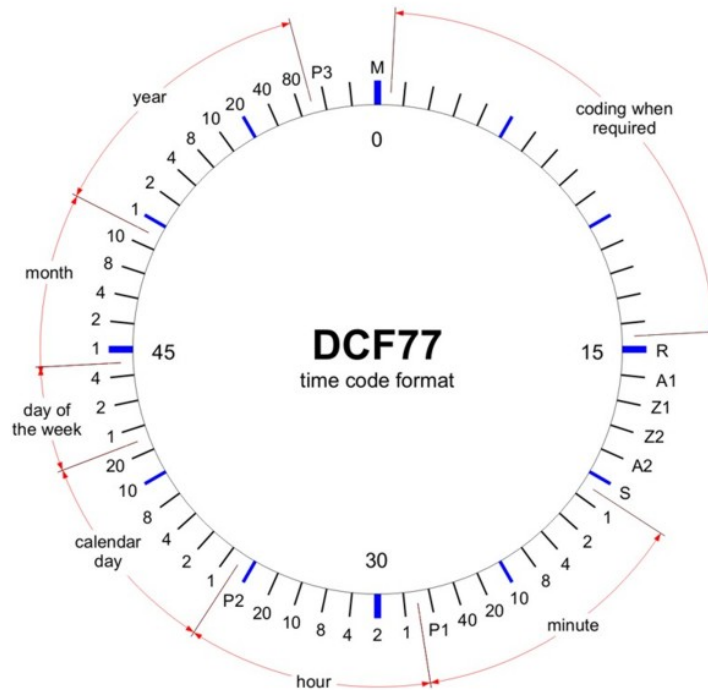


Figure 8: A percenkénti jel felbontása

A fentebb látható kör 60 egységre felbontva felel meg az egyperces jelnek. Minden egyes másodperc egy bitet jelöl, amit dekódolásnál a jelfeldolgozó egység visszafordít decimális értékre.

1. Az első teljes negyed szabadon van hagyva a rendszerinformációknak. Itt jelennek meg egyebek mellett az óraátállítás, a vészjelzések amikor szükséges.
2. A második negyed első fele jövőbeni célokra van fenntartva. Ha a PTB új funkciót szeretne implementálni az adásba (Például azt szeretnék, hogy a holdállást is tartalmazza a DCF77), akkor ez a rész felhasználható, anélkül, hogy a meglévő rendszert és az összes jelenleg is üzemelő DCF-jeladót módosítani kellene.
3. Ez után az idő- és a dátuminformációk következnek, leszámítva az utolsó 3 másodpercet.
4. Az utolsó 3 másodperc ad keretet a jelnek. Enélkül, a dekódolás folyamán nem lehetne eldönteni, hogy hol kezdődik újra a szekvencia, és annak

különböző részei, ennek következtében elcsúszva rossz időt eredményezne a vevőt tartalmazó eszköz számára.

8 A mérés

8.1 Konceptió

A KTDK ötletét egy korábbi, 2017-es kutatás (Software-Defined Radio Decoding of DCF77: Time and Frequency Dissemination with a Sound Card) adta, amit Jean-Michel Friedt, Clément Eustache, Émile Carry, and Enrico Rubiola végzett, a francia FEMTO-ST intézet közreműködésével. Mérésük arra irányult, hogy a DCF77 egyperces szekvenciája hogyan veszít pontosságából, nyúlik vagy rövidül az időjárás viszonyosságok hatására, a GPS jellel összehasonlítva. Ennek kimutatását saját antennával és szoftverrádióval végezték.

A jelen kísérlet abban más, hogy ahelyett, hogy az időbeli eltérésekre fókuszálna, inkább a jel amplitúdóváltozását vizsgálja az időjárás körülmények függvényében. A mérés így nem igényel annyi időt, és kisebb léptékben is megvalósítható.

A folyamat nagyvonalakban a következő: A DCF77 amíg Mainflingenből eljut Budapestre kiszolgáltatva a környezeti hatásoknak, megváltozik, amplitúdója a normál értékhez képest minimálisan eltolódik. Az érkező adást egy megfelelő antenna és egy SDR segítségével digitalizáljuk, majd a GNURadio szoftverrel finomítjuk és zajszűrést végzünk rajta. Az így kapott amplitúdó összesített értéket decibelbe (dB) váltjuk át, mivel ez a bevett mértékegység a jelszint jellemzésére. A decibelnek számos hasznos tulajdonsága van: egyszerűbb a mennyiségek összeadása, és az emberi hallás is közelítőleg logaritmikus, így megközelítőleg decibelskálán mozog. A decibelértéket a következőképp számoljuk:

$$X_{<dB>} = 20 \log_{10} X_{<m>} \quad (1)$$

A kutatás kezdetén konzulensem, Dr. Horváth Bálint elkezdett összerakni egy vevőkészüléket. Sajnos az antenna elkészítése nehézségekbe ütközött, mert a hagyományos DCF77 vevőkkel nem lehet számunkra megfelelő pontosságot elérni. A jel nagy hullámhossza miatt hatalmas (közelítőleg 1 kilométer hosszú) antennára lenne szükség, amit feltekeréssel a korábbiakban leírtak miatt (lásd: Alacsonyfrekvenciás hullámok) az effektivitás csökkentése nélkül nem lehet kibővíteni. Ezért mihamarabb új alternatívát kellett találni.

8.2 University of Twente: Wide-band WebSDR

A twentei egyetem amatőr rádiós clubja (ETGD) rendelkezik egy szélessávú szoftverrádióval, a WebSDR-rel, amit nyíltan bárki használhat az online felületen keresztül (lásd: Figure 9). A hallgatók egy egészen apró vevőt használnak, amire az egyetem egyik épületének a fémmel borított teteje tükrözi a rádióhullámokat.

Mivel nekünk megfelelő érzékenységű adó nem állt rendelkezésünkre, a méréshez szükséges adatokat a WebSDR használatával vettük fel.

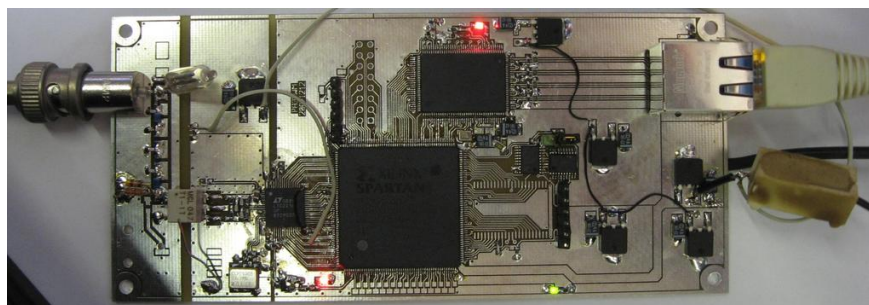


Figure 9: A Web-SDR jeledolgozó egysége: Bal oldalon fogadja a jeleket az antennából, jobb oldalon egy ethernet kimenete van, ami valószínűleg egy szerverhez kapcsolódik, ahonnan a weboldal fut.

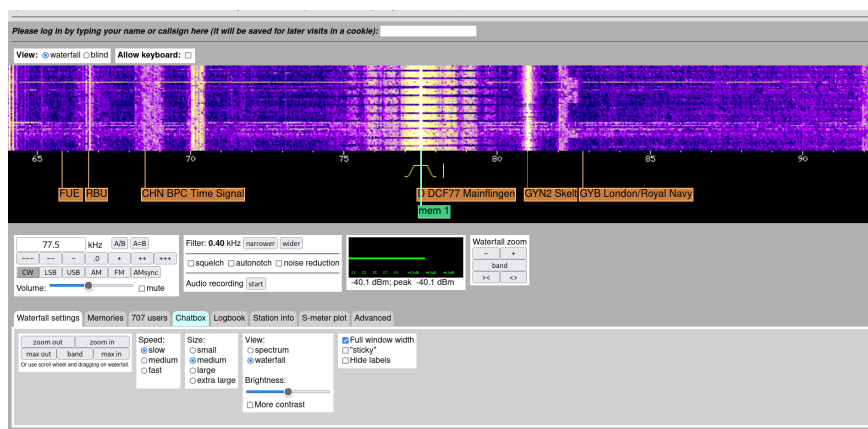


Figure 10: A Web-SDR oldala. A szaggatott vonalak miatt kiválóan látszik a DCF77 amplitúdómodulációja.

8.3 Adatgyűjtés

A méréshez többféle adatra volt szükség egy időben, míg konzulensem feldolgozta a felvételt, addig én az időjárási adatokat rögzítettem ugyan arra az időintervallumra (részleteket lásd később).

8.3.1 Jelfeldolgozás

A jelfeldolgozáshoz a GNURadio szoftver segítségével a következő eljárásokat alkalmaztuk a felvett adatokon:

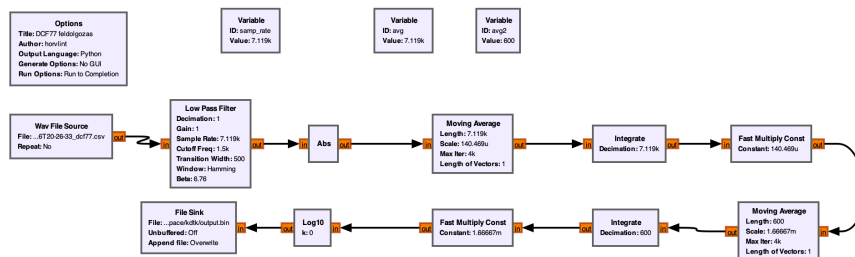


Figure 11: GNURadio: a jelfeldolgozásnál használt algoritmus(blockdiagramm)

A WebSDR-ből a 77,5 kHz-ről lekevert, digitalizált jel 7119 minta/másodperc mintavételi sebességgel érkezik (Ez a standard az oldalon). A vett jel nagyjából 1500 kHz sáv szélességű, ezért ennél nagyobb frekvenciaösszetevőjű jeleket egy aluláteresztő szűrővel (low pass filter) eltávolítva lehet a zajt csökkenteni. A cél az volt, hogy 10 percenként legyen egy mérési eredmény, ami a vett jel teljesítményével arányos.

A minták számát a következőképpen csökkentettük: először vettük a jel abszolút értékét, majd két lépésben végzünk mozgó átlagoló szűrést (Moving Average), és összegzést (Integration) a konstanssal való szorzás értéke úgy van beállítva, hogy az összegzés az átlagot adja (az átlagolás hosszának reciproka). A mozgó átlagoló blokk mindig az utolsó N minta átlagát adja, de nem változtat a mintavételi/adat sebességen, ezzel szemben az összegző blokk annyira részére csökkenti az adatsebességet, ahány elemre az összegzést végzi.

Az átlagolás és összegzés két fokozatra bontásának számítási illetve logikai szempontból van szükség. Ahhoz, hogy 10 percenként legyen egy mérési eredmény összesen $7119 * 60 * 10 = 4.271.400$ mintát kell összegeznünk, mely meghaladja az összegző blokk maximális kapacitását. Ebből kifolyólag logikusan az első lépésben a mintavételi sebességnek megfelelően, vagyis 7119 mintára végeztünk összegzést, amely így másodpercenként 1 eredményt ad. Ehhez igazodik a második fokozat, amely már csak $60 * 10 = 600$ elemet összegez. Az összegzések után decibelre (dB) váltjuk az értéket (lásd: 1. egyenlet 1).

8.3.2 Időjárás kigyűjtés

Összegyűjtöttem 5 nap időjárási adatait, a mérés pontossága miatt három ponton, Frankfurtban (Innen indul a DCF77), Dortmundban (A jel áthalad a városon) és Twente közelében (Ez útjának vége, a megfigyelt szakaszon). A folyamat automatizálására idő hiányában nem került sor (Pedig egy python program a ChatGPT API-nak segítségével valószínűleg képes lett volna rá). Így az adatokat kiírtam, és összegyűjtöttem egy excel táblázatban (lásd: Figure 12).

num	Time	Amplitude (dB)	Frankfurt				Darmstadt				Tweate				Average Temp.	Average Humidity	Average Wind	Average Pressure	
			Temp. (C)	Humidity	Wind	Pressure	Temp. (C)	Humidity	Wind	Pressure	Temp. (C)	Humidity	Wind	Pressure					
0	10/16/2023 20:30	-29.627265																	
1	10/16/2023 20:40	-28.990478																	
2	10/16/2023 20:50	-29.649403	20:51	11.1	95	6	995.6	8.7	91	0	994.9	9.3	96	2	994.6	9.7	94.666667	2.666667	995.03333
3	10/16/2023 21:00	-29.860832																	
4	10/16/2023 21:10	-30.361926																	
5	10/16/2023 21:20	-30.355967																	
6	10/16/2023 21:30	-29.58788																	
7	10/16/2023 21:40	-29.741718																	
8	10/16/2023 21:50	-30.232627	21:51	11.1	95	1.1	995.6	8.5	87	1.2	994.7	9.3	96	1.9	994.4	9.633333	92.666667	2.666667	994.9
9	10/16/2023 22:00	-30.145131																	
10	10/16/2023 22:10	-30.203165																	
11	10/16/2023 22:20	-30.316886																	
12	10/16/2023 22:30	-29.37106																	
13	10/16/2023 22:40	-30.581617																	
14	10/16/2023 22:50	-30.209341	22:51	11.3	94	3.1	994.9	8.7	87	1.1	994.1	9.3	96	3.9	994.1	9.766667	92.333333	2.7	994.36667
15	10/16/2023 23:00	-31.239962																	
16	10/16/2023 23:10	-30.773773																	
17	10/16/2023 23:20	-29.511815																	
18	10/16/2023 23:30	-29.349061																	
19	10/16/2023 23:40	-29.345997																	
20	10/16/2023 23:50	-30.463838	23:51	10.9	94	4.7	994.6	8.7	93	1.7	993.7	9.1	97	3.8	993.6	9.566667	94.666667	3.4	993.96667
21	10/17/2023 0:00	-29.90136																	
22	10/17/2023 0:10	-29.887323																	
23	10/17/2023 0:20	-30.338979																	
24	10/17/2023 0:30	-30.912195																	
25	10/17/2023 0:40	-31.208263																	
26	10/17/2023 0:50	-31.171068	0:51	10.5	92	6.2	994.3	8.7	91	2.3	993.2	8.9	97	3.8	993	9.366667	94	4.1	993.5
27	10/17/2023 1:00	-29.813566																	
28	10/17/2023 1:10	-28.851405																	
29	10/17/2023 1:20	-28.383919																	
30	10/17/2023 1:30	-29.616222																	
31	10/17/2023 1:40	-31.626979																	
32	10/17/2023 1:50	-31.977873	1:51	10.1	90	3.1	994.4	8.5	100	2.9	993.3	8.9	98	3.9	992.9	9.166667	96.333333	3.3	993.53333
33	10/17/2023 2:00	-29.897729																	
34	10/17/2023 2:10	-29.569186																	

Figure 12: Az excel gyors elemzés funkciója láthatóvá teszi az értékek átlagoltó való eltérését zöld-piros színezésben. Pusztán ez alapján is próbáltam mintát keresni, és szabályszerűséget sikerült is észrevennem.

8.4 Elemzés

Amint az az ábrán látható, a tízpercenkénti mintavétel mellé illesztetem a három ponton kigyűjtött időjárás adatokat. Mivel utóbbi csak óránként áll rendelkezésre, így a kész táblázatnak csak minden hatodik sora tartalmaz minden szükséges információt. Ezután külön táblázatba szedtem az időjárást, hogy az excel tudjon belőle grafikont generálni, és csináltam 5 ábrát, magáról a DCF77 amplitúdóváltozásáról, és egyenként az összes kigyűjtött faktorból (hőmérséklet, páratartalom, szélesebbesség és légnyomás). Ezeket az ábrákat arányos beosztással láttam el, aminek köszönhetően kellően látszanak az ingadozások. Idő hiányában nem tudtam átfogó elemzést adni, de a következtetés ezekből az ábrákból is lehonható.

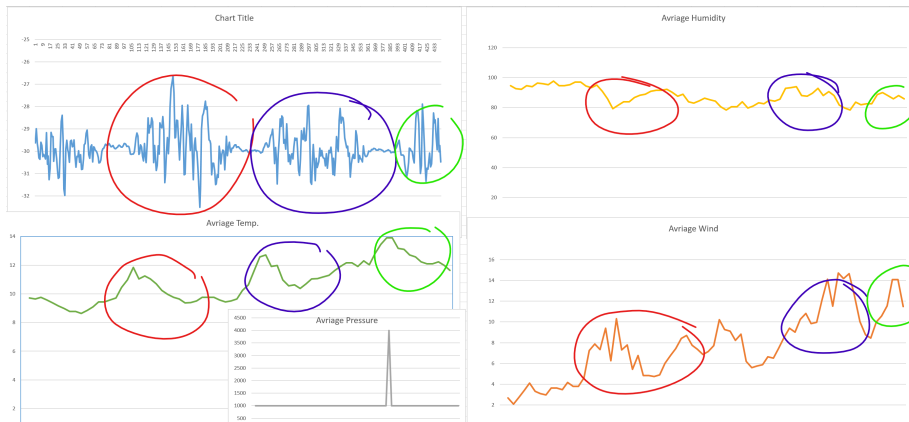


Figure 13: Megjelöltem a szélsőséges kilengéseket a grafikonokon, hogy jobban látszódnának a lehetséges egybeesések.

Világosan látszik, hogy összefüggés van az adatok között. Látszódik, hogy az eseményeket elsősorban valószínűleg a hőmérsékletváltozás váltja ki, hiszen az összes nagyobb változás az Average Temp. grafikonon jelenik meg rajzolódik ki. Hasonló a nedvesség (Average Humidity) is, de itt a kilengések nem olyan szignifikánsak, és úgy tűnik, mintha a hőmérséklet ingadozásait követnék. A szélső sebesség szélsőséges, de az előző két adatot követi, szóval nem tartom valószínűleg, hogy közvetlen okozója lenne a DCF77 kilengéseinek. A légnyomás szinte konstans, de van benne egy nagy szélsőérték. Nem tartom lehetségesnek, hogy a légnyomás pár óra leforgása alatt négyszeres értéket vegyen fel, így ezt mérési hibának könyveltem el.

9 Összegzés

Az értékek alapján megállapítható, hogy a DCF77 amplitúdó változásait elsősorban a hőmérséklet és a páratartalom ingadozása okozza. Ez valószínűleg összefüggésben áll a levegő vezetőképességével, ami az előző értékek bizonyos arányú szorzata.

Precízebb eszközökkel és részletesebb elemzéssel egészen biztosan pontosabb eredményekkel lehetett volna előállni, a kutatást jelenleg semmiképpen sem érdemes abbahagyni. Kellő precizitással és a hullámtani jellegzetességeket megfigyelve, akár azt is meg lehetne mondani, hogy a jel áthaladt e városokon útideje alatt.

Összességében tehát a mérést sikeresnek mondható. A cél az volt, hogy a jelet ért torzulásból vissza lehessen következtetni az azt ért időjárási viszonytagságokra, és ez sikerült: A nagyobb kilengések a hőmérséklet növekedését, és egyidejűleg a páratartalom megingását jelzik.

10 Felhasználás

A fent leírtak fényében tehát, az időjárás rádióhullámokkal történő elemzése jelenleg nem egy naprakész technológia. Egyenlőre nem nevezhetjük az eredményeket teljesen pontosnak, az egyéb zavaró jelek, a vevők apró hibái, illetve a módszer és az elemzés kiforratlansága miatt. Nagy gondot jelent még a különböző lakott területek, illetve antropogén struktúrák zavarása.

Ha fel akarjuk térképezni egy adott terület éghajlatát, vagy ideiglenesen nyomon akarjuk követni az ott uralkodó időjárási viszonyokat, eleinte mindenképp oda kell menni a helyszínre, műszereket telepíteni, amik adatai lokális információt fognak szolgáltatni az őket ért körülményekről.

Itt fontos hangsúlyozni a helyhez kötöttség, illetve azt, hogy a kitelepíthető mérőműszerek száma véges emellett mindegyik hatóköre lokális. Ha tehát egy nagyon nagy kiterjedésű területről szeretnénk időjárási adatokat gyűjteni, akkor sok helyen kell eszközöket telepíteni vagy kihelyezni, és méréseket végezni, a pontos eredmény érdekében.

Ha azonban rádióhullámokkal végeznénk ugyanazt a mérést, számos kellemtelenséget el tudunk kerülni. A mérni kívánt terület nagyságtól függetlenül, egy sáv kiértékeléséhez egy adó, és egy vevő szükséges. Rövid hullámok esetén hosszabb távon a föld gömbölyűsége limitáló tényező lehet. Hosszúhullámú rádióadást használva, a felhők és a talaj visszasugárzó hatása miatt, a sugár egy része ezek között közlekedve "beszorul" a légkör alsó rétegébe, ami így (a jelenség kicsit olyan, mint az optikai kábel) leköveti a földfelszín görbületét. Megfelelően hosszú hullámokkal ez a probléma a szó szoros értelmében kikerülhető.

Az ötlet legnagyobb előnye azonban mégis az, hogy a mérések elvégzéséhez nem kell közvetlenül ott lenni a helyszínen. Elsőre nehéz lehet elképzelni, hogy hol lehetne ezt a technológiát effektíven felhasználni, de mégis van rá számos példa.

Természeti katasztrófák alatt (vagy közvetlenül utánuk) veszélyes megközelíteni az érintett területet. Például egy tornádó belsejében vizsgálatokat végezni igazi kihívás, viharvadász autó nélkül az epicentrum közelébe férkőzni szinte lehetetlen. Közel repülni az erős légáramlás miatt nem lehet, a földi megközelítés pedig lassú, nem mindig lehet elég gyorsan követni a légörvényt ahhoz, hogy tényleg minden adatot ki tudjunk nyerni.

Itt jön a rádióhullámos mérés, ez ugyanis lehetővé teszi, hogy a légi megközelítést használva kellő sebességgel kövessük a tornádót, ugyanakkor biztonságos távolságot tartsunk tőle a drónnal, vagy helikopterrel. Az összehangolt mérés még hatékonyabb, mivel így egyszerre több adó és vevő tudja közrefogni a jelenséget, a több és pontosabb adatok kinyerése érdekében.

Ugyanígy egy vulkán esetében is komoly lehetőségeket látok a technika kiaknázására. Egy szunnyadó, vagy aktív tűzhányó megközelítése szinte lehetetlen és elképzelhető, hogy a feláramló füst miatt légi eszközökkel bizonytalan, netán veszélyes is lehet a mérés.

A lehetséges alkalmazások tárháza széleskörű, és nem muszáj feltétlen a földön maradnunk! A módszer más bolygók feltérképezésére is alkalmas lehet, sőt kifejezetten praktikus is. Ha még csak a naprendszerben mozgunk, akkor is

van jó pár olyan égitest (bolygó, vagy hold), amin ha fel akarjuk térképezni a környezeti körülményeket, nagyon költséges lenne műszert vagy egy róvert juttatni a felszínre. Sokkal olcsóbb és kivitelezhetőbb az égitest körül egymáshoz képest kicsit eltolva két műholdat szinkron-pályára állítani. Ebben az elrendezésben az egyik műhold rádióhullámokkal bombázza a planétát, amiket a ritkás atmoszféra minimálisan ugyan, de torzít. A bolygó vagy hold felszíne elnyeli, majd visszasugározza a jeleket, amik a sűrű légkör hiányában visszajuthatnak a másik műholdhoz, ami meg elemzi az adatokat. Egy, az égitest forgástengelyével közel 90°-ot bezáró szinkronpálya segítségével az egész bolygó, vagy hold letapogatható.

Összességében elmondható tehát, hogy technika elég széles felhasználási körrel rendelkezik. Jelenleg is komoly potenciállal hasznosítható, ám a jövőben egyre inkább hasznossá fog válni, ahogy tágul az általunk bejárt űr, és az égitesteket egyre messzebről, egyre pontosabban és egyre gyorsabban kell majd megismerni.

11 Források

11.1 Szöveganyag és cikkek

1. DCF77 Deutsche Wikipedia <https://de.wikipedia.org/wiki/DCF77>
2. DCF77 magyar Wikipédia <https://hu.wikipedia.org/wiki/DCF77>
3. Zeit- und Normalfrequenzverbreitung mit DCF77: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_4/4.4_zeit_und_frequenz/4.42/DCF77.pdf
4. Software-Defined Radio Decoding of DCF77: Time and Frequency Dissemination with a Sound Card (Jean-Michel Friedt, Clément Eustache, Émile Carry, and Enrico Rubiola, FEMTO-ST Institute, Time and Frequency, CNRS-UBFC ENSMM, Besançon, France, Master PICS, Université de Franche Comté, Besançon, France): <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017RS006420>
5. WebSDR weboldal: <http://websdr.ewi.utwente.nl:8901/>
6. GNURadio hivatalos oldala <https://www.gnuradio.org/>
7. GNURadio wikipédia https://en.wikipedia.org/wiki/GNU_Radio
8. Soós Katalin: Környezetfizika (egyetemi tankönyv)
9. Bencze P.-Major Gy.-Mészáros E.: Fizikai meteorológia (Akadémia kiadó Budapest 1982)
10. Soós Katalin-Nánai László: Az Atmoszféra
11. Unger János-Sümegehy Zoltán: Környezeti Klimatológia (Szegedi tudományegyetemi Tankönyv 2002)

12. Sándor Valéria-Wantuch Ferenc: Repülésmeteorológia (tankönyv 2004)
13. A Meteorológia Alapjai I.Rész, II.Rész Felhőatlasz (Szerzők: dr. Bartholy Judit, dr. Geresdi István, dr.Matasovszky István, dr. Mészáros Róbert, dr. Pongrácz Rita)
14. Rákóczi Ferenc: Életterünk a Légkör (Mundus kiadó)

11.2 Képanyag

1. Figure 1: <https://assets.roar.media/Sinhala/2017/08/23-701x399.png?w=700>
2. Figure 3: https://3.bp.blogspot.com/_achzrqWjHM/TQJ3Z4DaHrI/AAAAAAAAAGU/amNTqCago9o/s1600/ionisation.jpg
3. Figure 6: <https://www.vedantu.com/question-sets/94ded19b-dc90-4913-9eda-fa07cbce14fa6203236461296895656.png>
4. Figure 5: <https://i.ytimg.com/vi/9eFRyw8x-sY/maxresdefault.jpg>
5. Figure 7: https://cdn-reichert.de/bilder/web/xxl_ws/X600/DCF-MODUL.png
6. Figure 8: <https://www.hopf.com/pics/dcf77-time-code-format.jpg>

11.3 Közreműködtek

1. Gaál Nikolett dipl. meteorológus, dipl.alk. környezetkutató
2. Hartmann Lilla