

# Poslužitelj za pohranu i vizualizaciju podataka meteoroloških i amaterskih radiosondi

---

**Radović, Matija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:958320>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-01**



*Repository / Repozitorij:*

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 565

**POSLUŽITELJ ZA POHRANU I VIZUALIZACIJU PODATAKA  
METEOROLOŠKIH I AMATERSKIH RADIOSONDI**

Matija Radović

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 565

**POSLUŽITELJ ZA POHRANU I VIZUALIZACIJU PODATAKA  
METEOROLOŠKIH I AMATERSKIH RADIOSONDI**

Matija Radović

Zagreb, lipanj 2024.

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 565

Pristupnik: **Matija Radović (0036524435)**

Studij: Računarstvo

Profil: Znanost o podacima

Mentor: prof. dr. sc. Davor Petrinović

Zadatak: **Poslužitelj za pohranu i vizualizaciju podataka meteoroloških i amaterskih radiosondi**

### Opis zadatka:

U sklopu diplomskog rada potrebno se upoznati s načinom rada meteoroloških atmosferskih radiosondi koje se koriste za vertikalna sondažna mjerenja stanja atmosfere. Također je potrebno istražiti načine kako izmjerene podatke ovih sondi koji se emitiraju radioprijenosom snimiti i dekodirati primjenom odgovarajućih programskih rješenja uz korištenje programski definiranih prijemnika (SDR) i ugradbenih računalnih platformi malih cijena. Istražiti postojeće prijemnike, standarde i protokole za slanje izmjerenih podataka kroz Internet do javno dostupnih mrežnih poslužitelja za agregiranje prikupljenih podataka iz višestrukih prijemnika. Posebnu pažnju posvetiti poslužiteljima temeljenim na otvorenom kodu, te istražiti mogućnosti prilagodbe i podizanja vlastitog poslužitelja. S obzirom na veliku količinu vrijednih informacija koji se nalaze na ovim poslužiteljima, istražiti postupke i rješenja za korištenje ovih povijesnih podataka, kao i aktualnih podataka iz raznovrsnih javno dostupnih izvora za gradnju i estimaciju parametara modela aktualnog stanja atmosfere odnosno predikciju očekivane trajektorije leta radiosonde u ovisnosti od mjesta njezinog lansiranja.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

*Veliko hvala mami, tati i bratu što su uvijek bili uz mene. Jednako hvala svim mojim prijateljima bez kojih ne bi uspio završiti fakultet, te mentoru Davoru Petrinoviću na razumijevanju i susretljivosti.*

# Sadržaj

Uvod .....	1
1. Uvod u meteorološke atmosferske radiosonde .....	3
1.1. Princip rada radiosondi .....	3
1.1.1. Senzori u radiosondama .....	3
1.1.2. Odašiljač u radiosondi .....	4
1.1.3. Balon radiosonde .....	4
1.2. Prikupljanje podataka i primjena .....	5
1.2.1. Komunikacija s prizemnim stanicama .....	6
1.2.2. Praktična primjena i važnost radiosondi u meteorologiji .....	9
1.2.3. Primjeri upotrebe radiosonde u specifičnim istraživanjima .....	10
1.2.4. Skew-T Log-P dijagram .....	11
1.3. Modeli radiosondi .....	13
2. Software-Defined Radio (SDR) tehnologija .....	16
2.1. Osnove SDR tehnologije .....	16
2.1.1. Razlika između SDR-a i tradicionalnih radioprijamnika .....	17
2.1.2. Hardverska arhitektura SDR-a .....	18
2.1.3. Digital Signal Processor (DSP) .....	21
2.1.4. Field Programmable Gate Array (FPGA) .....	21
2.2. SDR Modeli i primjena u prijemu podataka s radiosondi .....	22
2.2.1. SDR Modeli .....	23
2.2.2. Primjena SDR-a u prijemu podataka radiosondi .....	24
2.2.3. Softveri za dekodiranje signala radiosondi pomoću SDR-a .....	25
2.2.4. Izazovi i ograničenja SDR-a .....	27

3.	Prijenos i agregacija meteoroloških podataka .....	28
3.1.	Modulaciju podataka .....	28
3.1.1.	Analogne vrste modulacije u komunikaciji radiosondi .....	29
3.1.2.	Digitalne vrste modulacije u komunikaciji radiosonda .....	32
3.1.3.	Primjena modulacijskih tehnika kod meteoroloških radiosonda .....	33
3.2.	Protokoli za prijenos meteoroloških podataka internetom .....	36
3.2.1.	HTTP/HTTPS protokol .....	37
3.2.2.	FTP/FTPS protokol .....	37
3.2.3.	MQTT protokol .....	38
3.2.4.	Alternativa internet protokolima – APRS sustav .....	40
3.3.	Postojeći softver za dekodiranje i slanje podataka radiosonda putem interneta..	41
3.3.1.	Dx1APRS-SHUE .....	41
4.	Poslužitelji za prikaz i agregaciju telemetrijskih podataka .....	45
4.1.	Radiosondy .....	45
4.2.	SondeHub .....	47
5.	Vlastiti poslužitelj za prikaz i agregaciju meteoroloških podataka .....	51
5.1.	Podizanje SondeHub poslužitelja na vlastitom računalu.....	51
5.2.	Modificiranje SondeHub poslužitelja.....	52
5.2.1.	Potrebne modifikacije za rad s vlastitim API serverom .....	52
5.2.2.	Potrebne modifikacije za rad s MQTT serverom .....	53
5.3.	Podizanje vlastitog API servera za agregaciju telemetrijskih podataka .....	54
5.3.1.	Spremanje telemetrijskih podataka radiosonda .....	55
5.3.2.	Dohvaćanje telemetrijskih podataka radiosonda .....	57
5.4.	Podaci, limitacije i unaprijeđena .....	59
	Zaključak .....	60
	Literatura .....	61

Sažetak.....	64
Summary.....	65



# Uvod

Vrijeme koje mi doživljavamo i vidimo na tlu je dio dinamičnog i kompleksnog sustava koji se događa visoko u atmosferi. Iako nam promatranje i mjerenje vremenskih uvjeta na tlu pruža trenutačno stanje vremena i kratkoročno prognoziranje, za razumijevanje i predviđanje vremenskih fenomena i dugoročnijeg predviđanja vremena potrebna su mjerenja atmosferskih uvjeta na svim razinama atmosfere. Razlog tome je što atmosfera nije homogena, njeni slojevi protežu se od razine mora sve do oko 100 km u visinu, gdje svaki sloj ima svoje karakteristike koje utječu na vrijeme i klimu.

Grana znanosti koja se bavi proučavanjem atmosferskih procesa i pojava zove se meteorologija. Ova grana znanosti ključna je za razumijevanje kako se vrijeme mijenja ovisno o prostoru i vremenu, te također za razumijevanje kako pojedini slojevi utječu jedni na druge i s time na vrijeme. U suštini osnovni cilj meteorologije je predviđanje vremena kako bi imali što točnije prognoze vremena koje su neophodne za različite industrije (na primjer poljoprivredu i avio industriju), a i samim time i za nas i naše djelovanje. Točnost vremenskih prognoza ovisi o preciznosti mjerenja atmosferskih parametara kao što su vlaga, tlak i temperatura.

Razvoj tehnologije kroz povijest omogućio je meteorolozima sve preciznija i detaljnija mjerenja atmosferskih parametara. Dok su instrumenti poput barometra i termometra omogućivali osnovna mjerenja, s malom preciznosti, razvoj elektrotehnike, računala i satelitske tehnologije omogućio je prikupljanje velike količine preciznih podataka na svim razinama atmosfere, te također njihovu obradu i pohranu. U današnje vrijeme, za prikupljanje podataka o atmosferi, najčešće se koriste sateliti i radiosonde uz pomoć naprednih računalnih modela čijom kombinacijom se pružaju informacije koje su ključne za razumijevanje vremena i klime. Podaci koje takve tehnologije prikupljaju omogućuju znanstvenicima i meteorolozima da prate atmosferu na globalnoj razini, te da predviđaju vremenske uvijete s velikom točnošću. Mjerenje atmosferskih uvjeta provodi se s pomoću širokog spektra tehnologija i instrumenata, jedne od tih su

tradicionalne meteorološke stanice na tlu pa sve do satelita i radiosonda koje imaju mogućnost prikupljati podatke na raznim visinama atmosfere.

Meteorološke stanice su osnovni sustav za prikupljanje podataka na tlu. Mjerenja koje takve stanice pružaju su temperatura, tlak, vlaga, brzina i smjer vjetra, količina oborina i još mnoge druge dodatne podatke. S pomoću podataka prikupljenih putem meteoroloških stanica moguće je predvidjeti kratkoročno vrijeme, te se mogu pratiti vremenski uzorci.

S druge strane imamo sofisticirane satelite koji su ključni za predviđanje vremena na globalnoj razini. S pomoću njih se mogu kontinuirano pratiti atmosferski parametri iz svemira. Sateliti nam pružaju informacije o oblacima, o snježnim pokrivačima, o temperaturi površine mora i mnogim drugim parametrima. Također sateliti su posebno praktični kada treba pratiti ogromne površine atmosfere/tla kontinuirano.

Radiosonde najvažniji su instrument prilikom vertikalno sondažnih mjerenja atmosfere. Slično kao i meteorološke stanice na tlu, radiosonde su opremljene raznim uređajima za mjerenje atmosferskih parametara. Radiosonde funkcioniraju na principu da ih se lansira s pomoću balona, koji je najčešće ispunjen helijem, kako bi radiosonda zbog svoje male težine poletjela u atmosferu i u nekom trenutku pala. Postoje i varijante radiosonda gdje se može odrediti točno vrijeme kada će balon pasti, te radiosonde koje stanu na nekoj visini atmosfere te tako lebde. Podaci koje radiosonde prikupljaju šalju se s pomoću radio signala natrag na Zemlju čime se postiže da meteorolozi imaju precizno praćenje promjena parametara atmosfere s visinom.

Zbog važnosti meteoroloških podataka stvorila se potreba za poslužiteljima koji mogu prikazivati i agregirati takve podatke. U današnje vrijeme postoji mnogo poslužitelja takve vrste, no svaki ima neka svoja ograničenja zbog čega ćemo u ovom radu pokazati kako se jedan takav vlastiti poslužitelj podiže i koristi.

# 1. Uvod u meteorološke atmosferske radiosonde

U ovom poglavlju govorit ćemo o radiosondama koje se koriste za vertikalno sondažnih mjerenja atmosfere. Prvo ćemo proći kroz princip rada meteoroloških radiosonda te ćemo govoriti o komponentama radiosonda i njihovim ulogama. Nakon toga govorit ćemo kako se takve radiosonde lansiraju te kako se uz pomoć senzora prikupljaju podaci te ćemo potom ući u praktičnu primjenu radiosonda što uključuje njihovu ulogu u predviđanju vremenskih prognozi.

## 1.1. Princip rada radiosondi

Kao što smo već napomenuli u uvodu radiosonde su uređaji s pomoću kojih se mogu dobiti mjerenja atmosferskih parametara. Uobičajeno se sastoje od tri osnovne komponente koje su: skup senzora, odašiljač te balon. Svaka od tih osnovnih komponenti igra važnu ulogu u funkcionalnosti radiosonda.

### 1.1.1. Senzori u radiosondama

Bez senzora ne bi imali mjerenja što ovu komponentu čini ključnom komponentom u radiosondama. Senzori u radiosondama su precizni uređaji koji mjere atmosferske parametre što uključuje temperaturu, tlak, brzinu i smjer vjetra, relativnu vlažnost, vertikalnu i horizontalnu brzinu te poziciju u svijetu. [1] Senzor za temperaturu je električna komponenta koja se zove termistor, ona reagira na promjenu temperature tako da se otpor u komponenti mijenja. Termistori su izuzetno osjetljivi te omogućuju precizno mjerenje temperature u ekstremnijim uvjetima koji se nalaze u višim dijelovima atmosfere.

Još jedan ključan senzor u radiosondama su senzori za mjerenje tlaka. Kod radiosonda tlak se može mjeriti s pomoću barometarskih senzora koji koriste piezoelektrične ili kapacitivne komponente. S pomoću tlaka moguće je odrediti nadmorsku visinu radiosonde. Nadalje postoji senzor za mjerenje vlažnosti, u čiju se svrhu najčešće koriste higrometri, koji mjere relativnu vlažnost zraka. Ovi senzori koriste razne materijale osjetljive na vlagu kao što su polimerni ili

keramički filmovi koji mijenjaju svoja električna svojstva ovisno o količini vlage u zraku. Vodena para apsorbira i emitira infracrveno zračenje čime utječe na toplinsku ravnotežu atmosfere. Također uz pomoć relativne vlažnosti zraka se može dobiti uvid u formiranje oblaka i oborina.

Također spomenuto je da radiosonde mjere brzinu i smjer vjetra. To se može postići na osnovi GPS signala radioprijemnika. Brzina i smjer vjetra ključan su faktor u određivanju i razumijevanju prijenosa energije kroz atmosferu i kretanja zračnih masa poput oblaka. Velike promjene u brzini i smjeru vjetra mogu ukazivati na razne vremenske pojave poput oluja i vremenskih fronti.

### **1.1.2. Odašiljač u radiosondi**

Odašiljači su radiokomunikacijski uređaji koji koriste elektromagnetske valove kako bi odašiljali poruke [2]. U kontekstu radiosonda odašiljač je važna komponenta jer omogućuje prijenos prikupljenih senzornih i drugih podataka do prijarnika na zemlji. Za slanje podataka, radiosonde koriste radiofrekvencijski prijenos od kuda dolazi i sam naziv za radiosondu. Kako bi podaci stigli do stanica na zemlji signal koji odašiljač odašilje mora biti dovoljno snažan kako bi prijenos podataka bio pouzda i na velikim udaljenostima, nerijetko čak i do 100 kilometara udaljenosti, no u isto vrijeme treba biti lagan i učinkovit da ne utječe na samu radiosondu i njezine performanse.

### **1.1.3. Balon radiosonde**

Još jedna od ključnih elemenata radiosonda je balon. [3] Baloni koji se koriste za podizanje radiosonda najčešće su napravljeni od materijala poput lateksa ili polietilena jer im to omogućuje otpornost na promjene tlaka tijekom uspona. Nadalje baloni se pune plinovima koji su lakši od zraka primjerice helij ili vodik kako bi se balon i ostale komponente radiosonde mogle podignuti u zrak. Helij ima sigurnosnu prednost pošto nije zapaljiv kao vodik, no vodik je jeftiniji od helija. Kada se balon uspinje u atmosferi, dolazi do smanjenja atmosferskog tlaka što uzrokuje širenje balona, budući da je unutarnji tlak balona veći od vanjskog. Balon se širi sve dok materijal od koje je napravljen ne dosegne svoju granicu elastičnosti, nakon čega puca. U pravilu pucanje balona se dešava na visinama između 20 i 40 kilometara iznad razine mora. Nakon pucanja balona, radiosonda

započinje slobodan pad prema Zemlji. Kako ne bi došlo do oštećenja opreme prilikom udarca u tlo, radiosonde nerijetko imaju još i padobran.

## **1.2. Prikupljanje podataka i primjena**

Kako bi meteorološka radiosonda uopće mogla prikupljati podatke te ih potom slati na zemlju potreban je složen postupak pripreme i precizno izvođenje kako bi se osiguralo da radiosonda uspješno poleti i prikuplja kvalitetne podatke.

Proces života meteorološke radiosonde započinje s njezinom pripremom i lansiranjem sa zemlje. Za početak je potrebno pripremiti radiosondu i balon. Te radiosonde koje se pričvršćuju na balon su kompaktni i lagani uređaji sa svim potrebnim sensorima za mjerenje atmosferskih parametara poput temperature i vlažnosti. Također radiosonda u sebi sadrži i odašiljač, kako bi se podaci mogli poslati natrag na zemlju, i GPS za praćenje lokacije na zemlji. Nakon što imamo radiosondu i balon potrebno je ispuniti balon sa željenim lakim plinom. Češće se puni s helijem zbog sigurnosnih razloga iako je vodik jeftiniji, sve dok balon ne postigne dovoljnu silu uzgona da podigne radiosondu u atmosferu. Prilikom punjenja balona treba paziti da je balon dovoljno pun da podigne radiosondu, ali i da nije prepun pa da prerano pukne tijekom leta u atmosferu.

Nakon ispunjenja balona radiosonda se pričvršćuje na balon. Ovaj proces pričvršćivanja radiosonda na balon uključuje osiguravanje čvrstog spoja između balona i radiosonde, te dodatnu opremu kao što je reflektirajuća traka ili neki svjetlosni signal za lakše praćenje sonde tijekom lansiranja noću. U tu dodatnu opremu još nerijetko dolazi i padobran koji se aktivira nakon pucanja balona.

Uz završenu pripremu treba se još meteorološka radiosonda lansirati kako bi započela svoja mjerenja atmosfere. Lansiranje se obično obavlja na otvorenim prostorima kako meteorološka radiosonda ne bi zapela za neku prepreku poput drveta, zgrade ili električnih vodova. Također tijekom lansiranja potrebno je pripaziti na vanjske vremenske uvjete kao što je jaka kiša ili jak vjetar koji mogu utjecati na putanju balona i kvalitetu prikupljenih podataka.

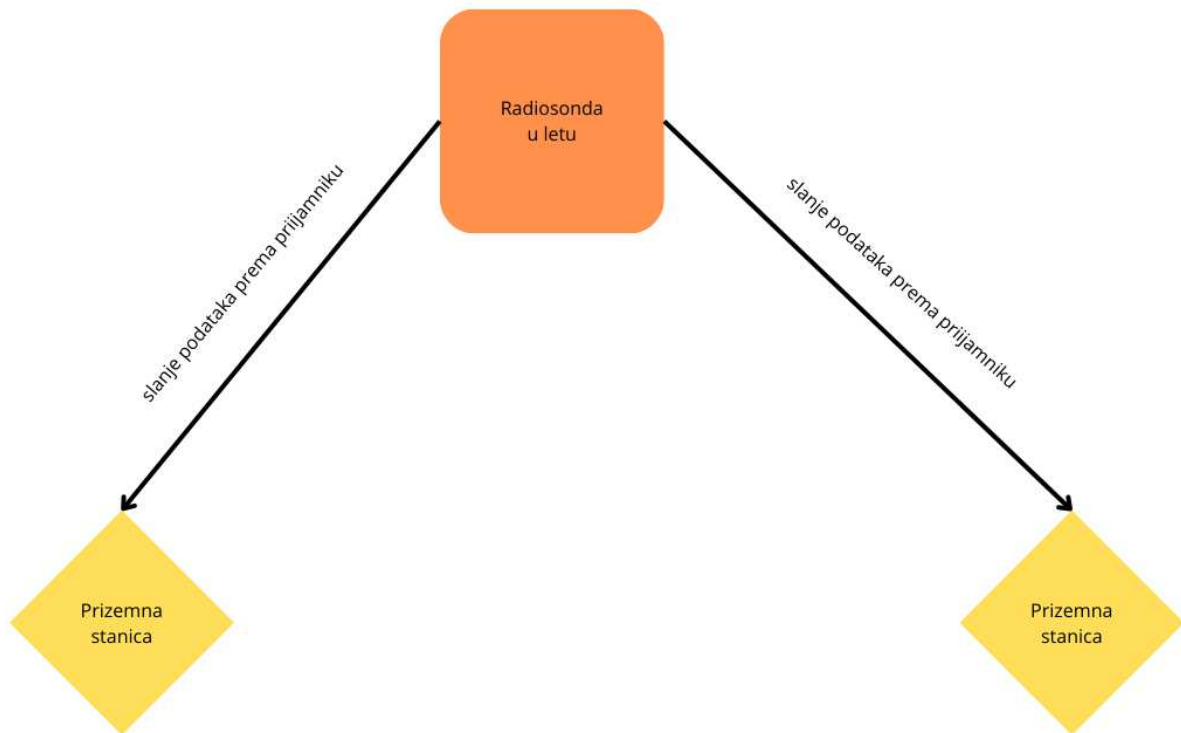
Kada je meteorološka radiosonda lansirana ona započinje svoj uspon kroz atmosferu. Kako balon podiže radiosondu sve više, ona prolazi kroz različite slojeve atmosfere, a dok prolazi odašilje tj. bilježi atmosferske uvjete sa svojim

senzorima. U normalnim uvjetima balonu treba između jedan i dva sata, ovisno o visini koju meteorološka radiosonda može dosegnuti. Kako balon doseže svoju maksimalnu visinu tako se on širi zbog smanjenja atmosferskog tlaka, sve dok ne dosegne visinu između 20 i 40 kilometara iznad razine mora gdje obično pukne.

Tijekom cijelog svog leta meteorološka radiosonda se prati uz pomoć GPS sustava koji je integriran u radiosonu. GPS nam omogućuje precizno i točno praćenje leta sonde u stvarnom vremenu, što je ključno za prikupljene podatke kako bi znali na kojoj lokaciji u svijetu su dobiveni prikupljeni podaci i kako bi mogli mapirati putanju radiosonde i analizirati struje koje utječu na kretanje. Praćenje nije samo važno za prikupljanje podataka već i radi sigurnosti i lociranja radiosonda koje su već pale na tlo. Zbog svojeg potencijalno dugog dometa i vremenskih uvjeta koji su varijabilni potrebno je imati GPS kako bi se omogućilo predviđanje mjesta slijetanja čime se olakšava njezino pronalaženje i potencijalno novo korištenja ako nije došlo do pretjeranih oštećenja radiosonde.

### **1.2.1. Komunikacija s prizemnim stanicama**

Kao što je već spomenuto meteorološke radiosonde tijekom svog leta šalju podatke putem radio signala, interval slanja podataka najčešće je postavljen na jednu sekundu kako bi dobili što veću rezoluciju podataka. Za svrhu komunikacije između radiosonde i prizemne stanice koriste se različiti frekvencijski opsezi, najčešće VHF (eng. Very High Frequency) ili UHF (eng. Ultra High Frequency) spektri. Slika 1.2. prikazuje jednostavan prijenos podataka radiosonde do prizemne stanice koje zapravo imaju prijarnike koji dekodiraju primljene radio signale i pretvaraju ih u korisne podatke. [4] VHF obično pokriva frekvencije koje se kreću između 30 MHz i 300 MHz, dok UHF pokriva frekvencije između 300 MHz i 3 GHz. Razlog zašto se koriste ove frekvencije je zato što su pogodne u prijenosu radio signala na velike udaljenosti s relativno niskim gubicima u jačini signala. VHF frekvencije su korisne jer nam omogućuju da prenesemo signal kroz atmosferu s minimalnim utjecajem atmosferskih smetnji dok UHF omogućuju prijenos s većom rezolucijom podataka i boljom penetracijom kroz oblake i druge atmosferske prepreke. U suštini VHF i UHF omogućuju stabilan prijenos podataka od radiosonde do prizemne stanice.



**Slika 1.2:** Ilustracija prijenosa podataka od odašiljača koji se nalazi u radiosonda tijekom leta radiosonde do prijammnika koji su u radio stanicama na tlu. Više prijammnika može primiti signal u istom trenutku.

Prijemnici u prizemnim stanicama dizajnirani su da su vrlo osjetljivi kako bi se i najslabiji signali mogli primiti i dekodirati jer meteorološke radiosonde šalju slabe signale. To dolazi do izražaja kada su radiosonde već daleko otputovale od stanice ili kada su se popele na velike visine. Nakon što se uspješno primi signal on se zatim pretvara u digitalni signal koji se može obraditi određenim softverima koji su povezani s prijammnikom. Ovako postavljena stanica može primiti i raditi analizu podataka u stvarnom vremenu što je ključno kako bi se pravovremeno prognoziralo vrijeme i razumjeli atmosferski fenomeni. Svaki prekinuti signal ili signal s puno šuma koji se neće moći dekodirati može imati značajne posljedice na točnost vremenskih prognoza.

Što se tiče meteoroloških stanica postoje dvije vrste s obzirom na mobilnost, a to su mobilni i stacionarni [5], ovisno o potrebi za prikupljanjem podataka na različitim lokacijama. Stacionarne meteorološke stanice su trajno postavljene stanice koje se najčešće nalaze u meteorološkim centrima ili zračnim lukama gdje ima potreba za kontinuiranim prikupljanjem atmosferskih podataka. S

druge strane imamo mobilne meteorološke stanice koje su postavljene na brodove ili vozila poput auta kako bi se mogli premještati na druge lokacije prema potrebi. Ova vrsta meteoroloških stanica, kao što je prikazano na slici 1.3., izuzetno je korisna u situacijama kada treba prikupljati podatke s lokacija koja nisu pokrivena stacionarnim stanicama, kada se podaci trebaju prikupljati zbog određenih atmosferskih fenomena koji se kreću brzo kao što je oluja ili uragan ili kada treba pratiti određenu sondu da bi je kasnije pokupili i ponovo iskoristili za mjerenja.



**Slika 1.3.:** Primjer jedne mobilne meteorološke stanice iz 1974. koja je postavljena na vozilo.

Postoje mnogi izazovi prilikom komunikacije radiosonde i prizemnih stanica [6]. Jedan od najvećih je gubitak signala koji može biti uzrokovan različitim čimbenicima kao što su udaljenost ili fizičke prepreke između meteorološke radiosonde i stanice. Primjer fizičkih prepreka su planine, šume ili čak objekti koje je čovjek napravio. Ovi čimbenici su posebno izraženi još dok je sonda relativno nisko terenu gdje u takvim uvjetima može doći do prekida signala. Mobilne stanice ili višestruke stacionarne stanice mogu pomoći u otklanjanju ovog tipa smetnji. Dodatno atmosferski uvjeti kao što je oluja, grmljavina i gusti oblaci mogu uzrokovati smetnje u poslanom signalu. Kao što je prije rečeno VHF i UHF frekvencije su relativno otporne na takve smetnje, ali u ekstremnim uvjetima može



doći do grešaka u prijenosu ili čak do potpunog gubitka signala. Uz VHF i UHF još se koriste različite tehnike kao što je korištenje više frekvencija za prijenos podataka ili redundantni prijammnici.

### **1.2.2. Praktična primjena i važnost radiosondi u meteorologiji**

U današnjoj modernoj meteorologiji među najvažnijim alatima su radiosonde jer osiguravaju temeljne podatke za vremensku prognozu i znanstvena istraživanja. One prikupljaju podatke iz različitih slojeva atmosfere što nam daje detaljno razumijevanje atmosferskih procesa a s time i mogućnost boljeg predviđanja vremena, mogućnost analize klimatskih promjena ili čak za proučavanje specifičnih meteoroloških pojava.

Pošto meteorološke radiosonde putuju vertikalno po atmosferi moguće je dobiti vertikalni profil atmosfere što uključuje temperaturu, tlak, vlažnost i brzinu vjetra. Ti nastali profili atmosfere osnova su za razumijevanje, predviđanje dinamike atmosfere i vremenskih obrazaca. Kako bi znanstvenici, a time i meteorolozi dobili što više podataka meteorološke radiosonde se lansiraju dva puta dnevno s različitih brojnih lokacija čime se omogućuje konstantno praćenje atmosfere.

U vremenskoj prognozi, podaci prikupljeni meteorološkim radiosondama se koriste za inicijalizaciju numeričkih vremenskih modela [7]. Numerički vremenski modeli simuliraju ponašanje atmosfere s pomoću složenih matematičkih jednadžbi koji su povezani s fizikalnim zakonima kao što je termodinamika i dinamika fluida. Pošto su takvi modeli jako osjetljivi na početne uvjete podaci koje meteorološke radiosonde pružaju su prigodne za takve modele jer dobivaju trenutne podatke koji su nužni za točno inicijaliziranje modela, a posljedično se povećava i točnost predikcija vremenskih uvjeta. Također su radiosonde prigodne jer takvi modeli zahtijevaju precizne podatke o vertikalnoj strukturi atmosfere, kao što je temperatura i vlaga, a već smo naglasili da te sve podatke radiosonde mogu prikupljati.

Osim što se podaci prikupljeni od meteoroloških radiosonda koriste za vremenske prognoze, također se koriste i u znanstvenim istraživanjima atmosfere i klime [7]. Glavni izazovi u meteorologiji je razumijevanje kompleksnih interakcija

između različitih slojeva atmosfere, gdje onda podaci od radiosonda daju znanstvenicima podatke da proučavaju te interakcije u stvarnom vremenu. Primjerice s pomoću tih podataka moguće je dobiti uvid u procese poput formiranja oblaka, dinamike vjetra i prijenosa topline. Još jedna od istraživanja koja su danas vrlo popularna, a da im podaci od radiosonda koriste, su klimatske promjene gdje se povijesni podaci koriste za analizu trendova poput povećanja topline zraka i drugih atmosferskih parametara.

### **1.2.3. Primjeri upotrebe radiosonda u specifičnim istraživanjima**

U prethodnom potpoglavlju naveli smo neka općenita istraživanja u kojima se koriste podaci dobivene od meteoroloških radiosonda. Konkretno možemo navesti tri primjera istraživanja, a to su proučavanje olujnih sustava, atmosferskih slojeva i zagađenje atmosfere.

Proučavanje olujnih sustava, kao što je tornado ili uragan, jedan je od najvažnijih primjera upotrebe radiosonda. Podaci od meteoroloških radiosonda pružaju znanstvenicima vertikalno mapiranje podataka unutar i oko takvih sustava čime dobivaju ključne podatke o termodinamičkim i dinamičkim uvjetima koji pogoduju njihovom nastanku i daljnjem razvoju. Na primjer, može se lansirati radiosonda blizu tornada kako bi se pokupili podaci o vjetrovima i temperaturama na različitim visinama čime možemo dobiti uvid u intenzitet i putanju tornada, što je ključno za smanjivanje šteta i pravovremeno upozorenje za stanovnike koji su na predviđenoj putanji.

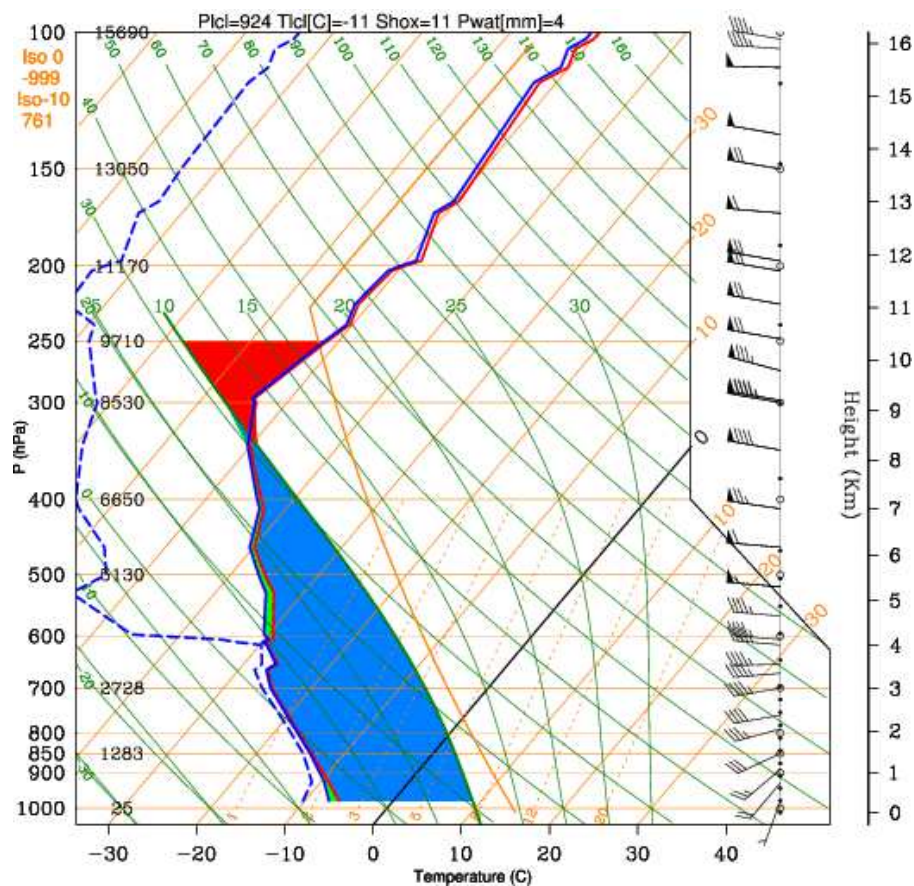
Također podaci dobiveni od radiosonda mogu se koristiti u istraživanju slojeva atmosfere poput troposfere i stratosfere, koje su ključne u razumijevanju globalne cirkulacije zraka i prijenosa energije u atmosferi. U stratosferi radiosonde se koriste za mjerenje koncentracije ozona i proučavanje dinamike tog sloja. Na primjer dugoročna mjerenja i povijesna mjerenja dala su nam ključne podatke o opadanju [25] ozonskog omotača, što je na kraju dovelo do globalnih inicijativa da se smanje emisije kemikalija koje uništavaju ozonski omotač.

Još jedan važan primjer upotrebe podataka dobivenih od radiosonda je učinak zagađenja zraka na atmosferske procese. Pošto teoretski nema ograničenja kakvi se senzori mogu staviti na radiosonde, moguće ih je opremiti i s

dodatnom opremom za mjerenje koncentracija aerosola i drugih zagađivača u atmosferi. Podaci o temperaturi i vlažnosti mogu pomoći pri razumijevanju utjecaja [24] aerosola i ostalih zagađivača zraka na formiranje oblaka i oborina. Na primjer, u istraživanjima su korištene radiosonde koje su mogle mjeriti količinu aerosola u zraku i time se pokazalo da određeni aerosoli mogu olakšati formiranje oblaka, dok drugi otežavaju taj proces što ima izravan utjecan na industriju i naše svakodnevne živote.

### 1.2.4. Skew-T Log-P dijagram

Meteorolozi za analizu vertikalnog profila koriste Skew-T dijagram, ili Skew-T Log-P dijagram. S pomoću ovog dijagrama omogućena je interpretacija temperature, vlage, pritiska i vjetra na različitim visinama, a time postaje ključan da se prognoziraju vremenske pojave kao što su oluje, grmljavine i stabilnost atmosfere. Naziv Skew-T dolazi od načina na koji su linije temperature nagnute (eng. *skewed*) prema desnoj strani dijagrama, dok log-P se odnosi na logaritamsku skalu pritiska tj. tlaka.



**Slika 1.4.** : Primjer Skew-T Log-P dijagrama. Na dijagramu su vidljive izotermne linije punom narančastom bojom koje su ukoso prema desno, a vrijednosti su na x-osi. Također se vide i izobarne horizontalne linije koje su također označene punom narančastom bojom, a vrijednosti su na y-osi.

Kao što je vidljivo na slici 1.4., Skew-T dijagram sastoji se od nekoliko vrsta linija [8], svaka s različitom funkcijom i značenjem:

- **Izobarne linije:** to su horizontalne linije koje predstavljaju konstantan atmosferski pritisak. Pritisak se prikazuje u hektopaskalima (hPa), a vrijednosti se smanjuju kako se ide prema gore na dijagramu
- **Izotermne linije:** to su dijagonalne linije koje su nagnute prema desnoj strani dijagrama. Ove linije predstavljaju konstantne temperature izražene obično u stupnjevima Celzijusa
- **Linije zasićene adijabate:** te linije prikazuju putanju zraka koji se hladi dok se diže i dok ne postigne zasićenje, nakon čega dolazi do kondenzacije. Ove linije su nagnute prema lijevoj strani i manje su nagnute od suho adijabatskih linija
- **Linije suhe adijabate:** te linije prikazuju kako se temperatura zraka mijenja dok se zrak diže ili spušta bez promjene u sadržaju vlage. Njihov nagib je između izoterme i linija zasićene adijabate
- **Linije konstantne relativne vlažnosti:** krivulje koje se savijaju prema gore desno i pokazuju relativan postotak vlažnosti
- **Vjetreni profil:** vjetreni profil daje nam informacije o brzini vjetra i njegovom smjeru na različitim visinama. Prikazuje se najčešće na desnoj strani dijagrama

Skew-T dijagram koristi podatke dobivene od meteoroloških radiosonda kako bi mogli analizirati i identificirati različite atmosferske slojeve i procjene njihovih stabilnosti. Jedna od analiza koje su omogućene Skew-T dijagramom je stabilnost atmosfere koja se dobi usporedbom stvarnog vertikalnog temperaturnog profila sa suho i zasićeno adijabatskim linijama. U slučaju da je stvarni temperaturni profil strmiji od suhe adijabate, atmosfera je u tom slučaju nestabilna što znači da može

doći do razvoja oblaka i oluja. S druge strane u slučaju da je profil manje strm od zasićene adijabate, tada se smatra da je atmosfera stabilna. Nadalje moguće je odrediti kondenzacijski [9] nivo LCL (Lifted Condensation Level) i nivo slobodne kondenzacije LFC (Level of Free Convection). LFC je visina na kojoj zrak, kada postigne zasićenje, postaje dovoljno hladan da se počne slobodno uzdizati, što može dovesti do razvoja olujnih oblaka. LCL je visina na kojoj zrak dostiže zasićenje i započinje kondenzacija vodene pare. Ta visina predstavlja visinu na kojoj će se početi formirati oblaci jer je relativna vlažnost dostiže 100 %. Visina LCL također može poslužiti kao indikator vlažnosti tla. Niži LCL sugerira vlažniji trak blizu površine, dok viši LCL sugerira da je suši zrak na blizu površine tla.

Također je moguće odrediti neke parametre na temelju Skew-T dijagrama kao što su parametri CAPE (Convective Available Potential Energy) i CIN (Convective Inhibition) [26]. Oni daju informacije o potencijalnoj energiji u atmosferi. CAPE parametar pokazuje energiju dostupnu za konvekciju i povezan je s potencijalom za formiranjem jakih oluja, dok CIN predstavlja potrebnu energiju za prevladavanje stabilnog sloja atmosfere. Ako je CIN nizak a CAPE visok to znači da je povećan rizik od jakih oluja. S druge strane ako su oba parametra visoko konvekcija može biti spriječena sve dok neki drugi faktor ne prevlada CIN, što može rezultirati naglim razvojem oluja. U praksi meteorolozi koriste CIN i CAPE za donošenje odluka o riziku od ekstremnih oluja, planiranju preventivnih mjera te se također može koristiti kao indikator za potencijalno vrijeme početka oluje i njezinog intenziteta i trajanja.

### 1.3. Modeli radiosondi

U ovom potpoglavlju proći ćemo kroz više vrsta najpopularnijih modela radiosonda koje se razlikuju po dizajnu i tehnologiji te posljedično i njezinim mogućnostima, a koriste se u većini svijeta. U nastavku navodimo neke od njih:

- **Vaisala RS41:** jedan od najnovijih i najnaprednijih modela radiosonda koju proizvodi finska tvrtka Vaisala [27]. Ova tvrtka dominira na tržištu meteoroloških instrumenata te je ovaj model radiosonde nastao kao poboljšanje na prijašnji model RS92, a poboljšanja su u kontekstu točnosti i pouzdanosti mjerenja. Za mjerenja parametara atmosfere koristi napredne

senzore, a za precizno praćenje položaja i brzine koristi GPS. U sva to poboljšanja također ima i automatske kalibriranje u stvarnom vremenu, čime smanjujemo potrebu za ručnim kalibriranjem i osiguravamo dosljednost podataka, i dizajniran je s naglaskom na ekološku održivost da se komponente mogu lako reciklirati.

- **Vaisala RS92:** model koji je prethodio Vaisala RS41 modelu je Vaisala RS92 model [27]. Ovaj model je smatran jednim od najkorištenijih u meteorologiji. Usprkos pojavi novijih modela poput RS41 modela, RS92 model je i dalje u upotrebi diljem svijeta. RS92 je pouzdan i precizan u mjerenju osnovnih atmosferskih parametara poput temperature, relativne vlažnosti i tlaka, te kao i RS41 model ima GPS za precizno praćenje položaja i mjerenja brzine vjetra. Za razliku od RS41 modela ovaj model nema automatsku kalibraciju čime se istiskuje više vremena i resursa, no to nije utjecalo na njegovu popularnost u meteorološkoj zajednici.
- **Meteomodem M10:** ovo je francuski model radiosonde koja se najviše koristi diljem Europe, te je napravljena s visokom preciznosti i fleksibilnosti kako bi mogla biti prilagodljiva specifičnim potrebama korisnika. Za mjerenja se koriste napredni senzori visoke preciznosti i može se podesiti na različite frekvencijske opsege čime je kompatibilan s različitim sustavima za prikupljanje podataka. Kao i prijašnje dvije radiosonde također u sebi sadrži GPS uređaj kako bi se mjerila brzina i točna lokacija radiosonde. Ovaj tip modela može izdržati ekstremne vremenske uvjete zbog čega je popularan u znanstvenim institucijama i u istraživanjima gdje je potrebna robusnost i izdržljivost radiosonde i njezinih instrumenata.
- **iMet-1:** iMet-1 je američki model radiosonde koji je dizajniran za istraživačke svrhe tako da nudi visoku preciznost i fleksibilnost potrebama korisnika. Kao i svaki model radiosonde koji je dizajniran za istraživačke svrhe, iMet-1 ima precizne senzore za mjerenje atmosferskih parametara. Jedna od glavnih prednost iMet-1 modela je modularnost, što omogućuje istraživačima i amaterima prilagodbu specifičnim potrebama. U prednosti još ulaze i napredne opcije za analizu i prikupljanje podataka.

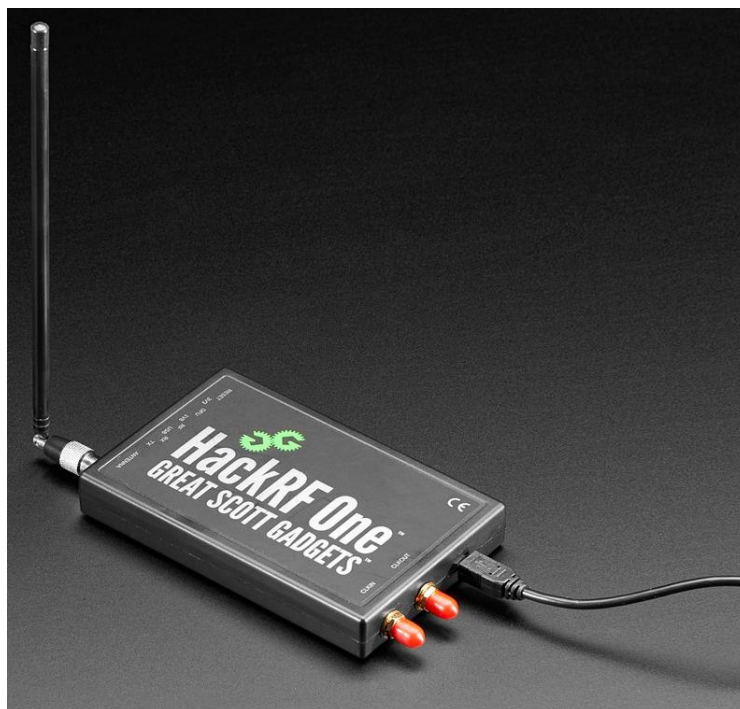
Kao što već znamo, radiosonde su ključan alat za mjerenje atmosferskih uvjeta na različitim visinama. Svaki model, koji smo prethodno nabrojali, ima svoje specifične karakteristike koje taj model čine pogodnima za određene aplikacije, te su time radiosonde korištene u različitim industrijama i područjima poput vojne industrije, znanstvenih istraživanja i meteoroloških mjerenja. Izbor odgovarajućeg modela radiosonde ovisi o potrebama korisnika i o uvjetima u kojim se mjeri.

## 2. Software-Defined Radio (SDR) tehnologija

U ovom poglavlju proći ćemo kroz tehnologiju SDR koja je unaprijedila meteorolozima način na koji mogu prikupljati podatke, analizirati ih i dekodirati. Kao što smo već rekli meteorološke radiosonde emitiraju na VHF i UHF frekvencijama svoje podatke prema radiostanicama na tlu. Tradicionalno radioprijamnici u meteorološkim stanicama su bili određeni hardverski te su bili specijalizirani za određene vrste signala. Pojavom SDR tehnologije omogućio se fleksibilniji i pristupačniji pristup prijemu radiosondinih podataka.

### 2.1. Osnove SDR tehnologije

Software-Defined Radio (SDR) tehnologija je promijenila način na koji se tradicionalno pristupa radiokomunikacijama. Tradicionalni radioprijemnici su dizajnirani da mogu obrađivati samo specifične vrste signala putem hardverskih komponenti, dok SDR koristi generički hardver gdje se stavlja fokus na obradu signala softverski [28]. Slika 2.1. prikazuje primjer izgleda jednog SDR-a.



**Slika 2.1.:** Primjer kako HackRF One SDR platforma izgleda



Osnovni koncept SDR-a je da se zamjene hardverske komponente poput filtera, demodulatora i dekodera softverskim algoritmima koji obavljaju iste zadatke kao i hardverske komponente. Ovime smo dobili da umjesto da se za svaku vrstu signala koristi drugačiji prijamnik, možemo koristiti SDR koji se može konfigurirati za različite frekvencije i modulacijske sheme jednostavnom promjenom softvera. To znači da isti hardverski uređaj može biti korišten za širok spektar primjena kao što su mobilne komunikacije i prijem satelitskih ili radio signala.

### 2.1.1. Razlika između SDR-a i tradicionalnih radioprijamnika

Kao što je već rečeno tradicionalni radioprijamnici su dizajnirani sa specifičnim hardverskim ograničenjima koje im omogućuju da primaju specifične vrste signala. Neke ključne karakteristike tradicionalnih radioprijamnika su [29]:

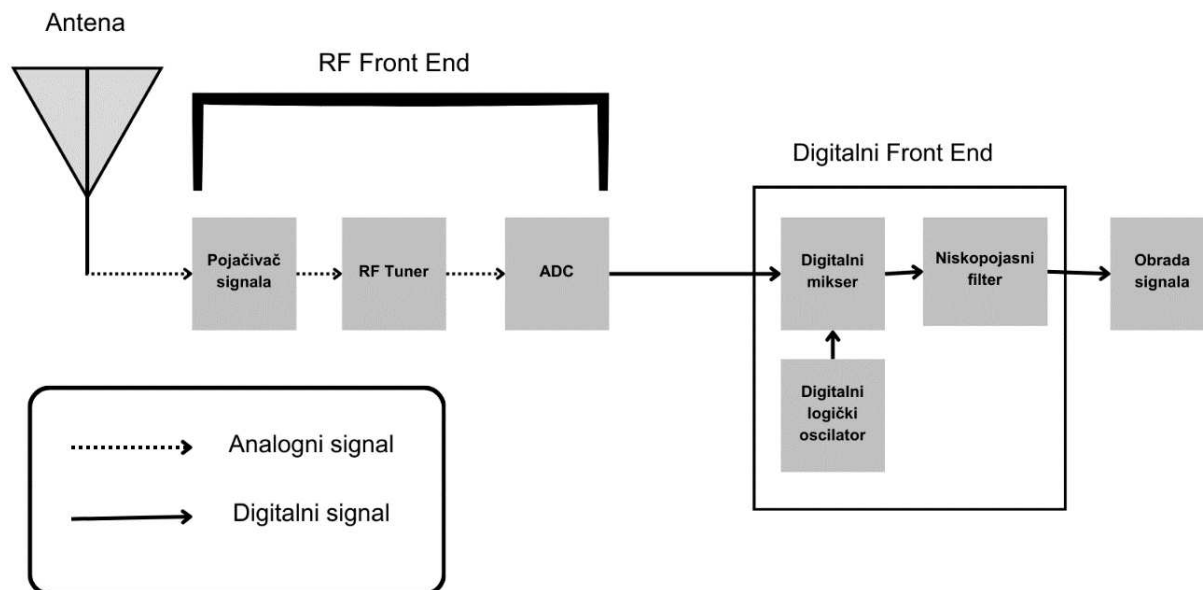
- **Ograničena fleksibilnost:** tradicionalni radioprijamnici su ograničeni na frekvencijski opseg i vrstu modulacije za koje su dizajnirani. Ako se pojave nove tehnologije ili standardi ova vrsta prijamnika će često trebati biti zamijenjena u cijelosti ili će biti potrebna promjena specifičnih komponenti.
- **Visoki troškovi i prostorna zahtjevnost:** ako trebamo primati više različitih frekvencijskih opsega i modulacijskih shema ova vrsta prijamnika može biti skupa i zauzimati puno prostora što može predstavljati problem u kontekstu meteoroloških stanica jer je prostor često ograničen i financije su također ograničene.
- **Fiksne komponente:** hardverske komponente kao što su filteri, pojačivači, demodulatori i dekoderi su fizičke komponente prisutne u tradicionalnim radioprijamnicima te se ne mogu lako mijenjati. Najčešće je potrebno zamijeniti cijeli prijamnik, a ponekad i same komponente.
- **Specifična hardverska konfiguracija:** Tradicionalni prijamnici mogu biti dizajnirani samo za određene frekvencije i tipove signala. Na primjer jedan radioprijamnik može biti dizajniran samo za VHF frekvencije i AM modulaciju, dok na primjer drugi prijamnik može biti samo specijaliziran za UHF frekvencije i FM modulaciju.

Za razliku od tradicionalnih radioprijamnika SDR predstavlja značajan korak u obradi signala i njihovom prijemu. Umjesto da se oslanja na hardverske komponente za obradu i prijem signala, SDR koristi softvaree za obradu i prijem signala čime se dobivaju sljedeće karakteristike [29]:

- **Softverska obrada:** za razliku od tradicionalnih prijamnika SDR za filtriranje, demodulaciju i dekodiranje koristi softverske algoritme. Time im je omogućeno da se lakše nadograđuju i prilagođavaju jer se promjene mogu implementirati putem softvera.
- **Širok spektar primjena:** SDR može pokriti širok spektar frekvencija i komunikacijskih standarda. Na primjer isti SDR se može koristiti kao prijem za satelitske signale, radio signale ili čak mobilnih komunikacija
- **Troškovna i prostorna efikasnost:** SDR prijamnici mogu smanjiti troškove i prostor jer smanjuje potrebu za specijaliziranim prijamnicima tako što jedan SDR može obavljati zadatke više prijamnika
- **Fleksibilnost i prilagodljivost:** SDR koristi generički hardver kao što su analogno-digitalni pretvarač (ADC) i digitalno-analogni pretvarač (DAC) koji mogu biti konfigurirani za različite frekvencije i modulacijske sheme s pomoću softverskih algoritama. Time je omogućen prijem i obrada različitih tipova signala, od AM i DM pa do SSB i digitalnih modova tako da se samo softver podesi. Također SDR omogućuje brzu prilagodbu novim tehnologijama.

### 2.1.2. Hardverska arhitektura SDR-a

Software Defined Radio (SDR) ima nekoliko ključnih hardverskih komponenti koje mu omogućavaju prijem, obradu i dekodiranje. [10] Neke od tih komponenti, vidljive na slici 2.2, su Antena, RF Front End, ADC (Analog-Digital Converter), Digitalni Front End i obrada signala.



**Slika 2.2:** Blok shema SDR prijmnika.

Za početak krenimo s antenom koja je prva komponenta u obradi signala u SDR prijmniku. Uloga antene je da prima elektromagnetske valove iz okoline te da ih pretvori u električni signal kako bi se dalje moglo obrađivati. Antene u SDR-u obično podržavaju različite vrste komunikacija pa su zato dizajnirane tako da pokrivaju širok raspon frekvencijskih opsega. Moderne SDR platforme koriste više antena kako bi se osigurala prilagodljivost različitim frekvencijama, kako bi se omogućila mobilna praćenja i/ili kako bi se mogla primijeniti tehnika MIMO (Multiple Input Multiple Output) čime se povećava kapacitet prijenosa podataka i pouzdanost prijenosa podataka. Također antene moraju ispunjavati neke uvjete kao što su sposobnost samopodešavanja i samousklađivanja u slučaju smetnji.

Nakon što je antena primila signal, sljedeća komponenta u SDR prijmniciima je RF Front End koji je odgovoran za prijem i transmisiju signala na različitim operativnim frekvencijama te prilagođavanje signala za njegovu daljnju obradu. Ovaj dio uključuje nisko-šumni pojačivač signala (LNA) koji pojačava slabe signale, a da istovremeno minimizira šum. LNA je kritičan u kontekstu radiosonda jer radio signali koje radiosonde odašilju su često vrlo slabe te ih je potrebno pojačati. Postoji još pretvarač frekvencije tj. mikser koji pretvara izvorne radiofrekvencije (RF) u međufrekvenciju (IF) radi daljnje digitalne obrade. Ovaj korak je važan jer omogućava da se digitalni signal obradi s većom preciznosti.

Znači u prijemnom putu signal prolazi kroz nisko-šumni pojačivač signala, zatim kroz mikser koji pretvara pojačanu radiofrekvenciju u međufrekvenciju [10].

Sljedeći korak u putu signala je analogno-digitalni pretvornik čija je zadaća da pretvara analogni signal, koji je kontinuiran u amplitudi i vremenu, u digitalnu domenu koja se sastoji od diskretnih vrijednosti. Ovom pretvorbom omogućena je daljnja obrada signala u digitalnom obliku. Kvaliteta analogno-digitalnih pretvornika utječe na performanse cijelog sustava pa je važno dobro odrediti najvažnije parametre kao što je brzina uzorkovanja i razlučivost. Brzina uzorkovanja je parametar s pomoću kojeg se određuje koliko često će analogno-digitalni pretvornik uzimati uzorke iz analognog signala. Razlučivost tj. rezolucija, u kontekstu analogno-digitalnih pretvornika, definira koliko precizno uzorci mogu biti kvantizirani u digitalnom obliku. Ako želimo što stvarnije prikazati analogni signal u digitalnom obliku, moramo postaviti ta dva parametra na visoke vrijednosti kako bi bili precizni.

Sada kada imamo digitalnu reprezentaciju analognog signala možemo nastaviti s digitalnom obradom signala. Daljnja obrada događa se u digitalnom front endu gdje se obavlja konverzija brzine uzorkovanja i kanalizacija. Kanalizacija uključuje selektiranje određenih frekvencijskih komponenti signala. U kontekstu SDR-a kanalizacija nam omogućuje selektiranje određenih frekvencija i kanala a da se ostatak ignorira. Konverzija brzine uzorkovanja služi kako bi se signal uskladio s frekvencijama uzorkovanja drugih komponenti u procesu. U kombinaciji ove funkcionalnosti digitalnog front enda su ključne za rad SDR-a u uvjetima gdje ima višestruko preklapanje signala na različitim frekvencijama.

Za kraj nam još ostaje obrada signala u čije svrhe se koriste različite tehnike i algoritmi za dekodiranje informacija u signalu. U ovom koraku se događa modulacija/demodulacija, filtriranje i kodiranje/dekodiranje. Filtriranje se koristi za uklanjanje neželjenih komponenti iz signala kao što je šum. Dekodiranje se koristi kako bi se uklonile nepotrebne informacije iz signala što omogućava da se detektiraju greške i isprave greške koje nastaju uslijed šuma ili smetnji dok je kodiranje suprotan proces od dekodiranja. [19] Modulacija je postupak obrade signala kojim se u prijenosni signal utiskuje signal informacije, a to se najčešće nalazi na emitirajućoj strani dok prijammici odrađuju demodulaciju kako bi se iz prijenosnog signala dobila informacija.

### **2.1.3. Digital Signal Processor (DSP)**

DSP je specijalizirani mikroprocesor [11] dizajniran tako da može brzo i učinkovito obrađivati digitalni signal čime se postiže obrada informacija u realnom vremenu. DSP je također specijaliziran za neke specifične zadatke, koji su vezani uz SDR, kao što je filtriranje, modulacija/demulacija i enkodiranje/dekodiranje. Jedna ključna karakteristika DSP-a je sposobnost izvođenja složenih matematičkih operacija s visokom učinkovitošću i brzinom. Na primjer DSP se može koristiti za izvođenje brze Fourierove transformacije (FFT) te drugih računalno zahtjevnijih algoritama za analizu signala.

Glavna prednost DSP-a je to što je fleksibilan i prilagodljiv raznim standardima. Njih se može isprogramirati za izvođenje raznih algoritama za obradu signala čime je pogodan za primjenu u širokom spektru aplikacija. Na primjer može se isprogramirati da se koristi za implementaciju različitih modulacijskih shema ili ga se može koristiti za filtriranje nepoželjnih frekvencija u signalu.

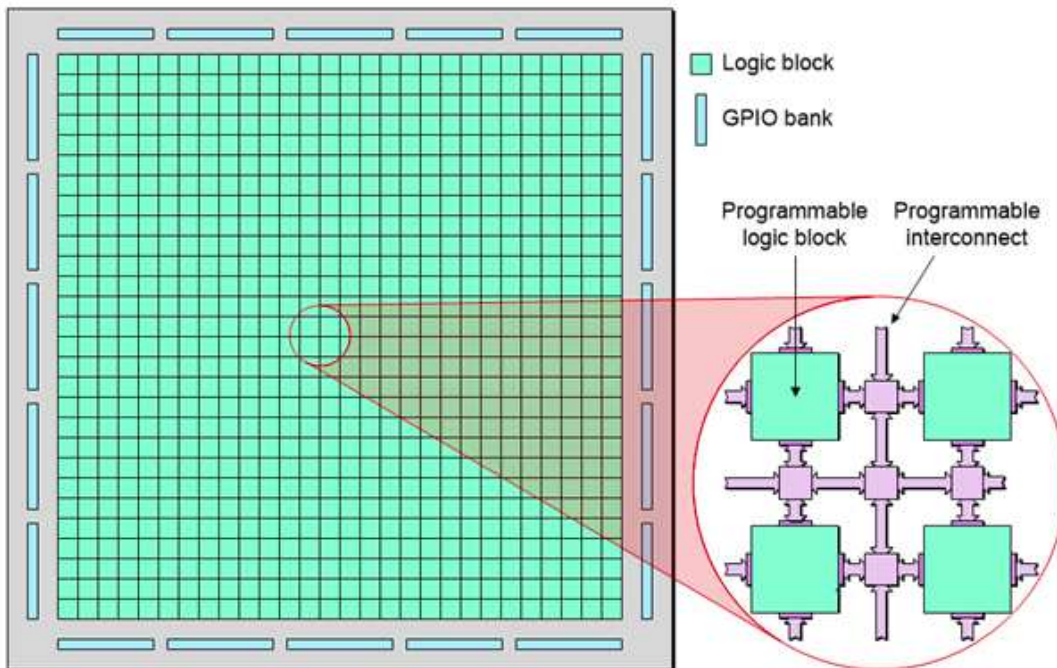
U kontekstu SDR-a, DSP je idealan jer se može koristiti za modulaciju različitih modulacijskih shema kao što je na primjer amplitudna modulacija (AM), frekvencijska modulacija (FM) i druge. A također ima mogućnost dinamičkog prilagođavanja modulacijskih shema u realnom vremenu. Filtriranje je još jedna od funkcionalnosti koje DSP koristi u SDR sustavu jer se mora osigurati kvalitetan signal i u uvjetima kada su razine smetnji visoke.

### **2.1.4. Field Programmable Gate Array (FPGA)**

[12] FPGA je tip integriranog kruga koji omogućava razvoj proizvoljne logike za brzo prototipiranje. FPGA je različit od drugih integriranih krugova s mogućnosti proizvoljne logike jer omogućuje da ga se programira i reprogramira putem softvera. U današnje vrijeme ovaj tip integriranih krugova ima najbrže rastuću primjenu jer se danas sve rapidno razvija te su potrebni fleksibilni sustavi.

Za razliku od DSP-a, koje je mikroprocesor, FPGA je hardverska komponenta. Jedna od glavnih prednosti FPGA-a je mogućnost paralelne obrade podataka, što značajno povećava brzinu obrade podataka. Najčešće se koristi u aplikacijama gdje su potrebne visoke performanse kao što je obrada signala u

stvarnom vremenu ili obrada velikih količina podataka. FPGA se često koristi u SDR sustavima kako bi se implementirali različiti filtri i modulacijske sheme. Također zbog svoje reprogramabilne prirode omogućuju jednostavnu prilagodbu i nadogradnju SDR sustava što značajno smanjuje trošak i vrijeme razvoja, a njegova brzina odgovara potrebnoj brzini za obradu digitaliziranog radiosignala.



**Slika 2.3:** [12] Slika prikazuje FPGA i njezinu reprogramabilnu mrežu što omogućuje gotovo bilo kakvu funkcionalnost. Reprogramiranje je moguće i poslije integracije FPGA-a tako da se ažurira softver.

## 2.2. SDR Modeli i primjena u prijemu podataka s radiosondi

U ovom potpoglavlju proći ćemo kroz neke specifične, ali i popularne SDR modele na tržištu koji se koriste u današnje vrijeme. Nakon toga proći ćemo kroz primjenu u prijemu podataka s radiosonda gdje ćemo se dotaknuti teme o konfiguraciji SDR-a i specifičnim softverskim alatima za dekodiranje signala radiosonda u SDR-u. I za kraj dotaknuti ćemo se teme o ograničenjima i tehničkim izazovima u primjeni SDR tehnologije.

U ovom potpoglavlju proći ćemo kroz neke specifične, ali i popularne SDR modele na tržištu koji se koriste u današnje vrijeme. Nakon toga proći ćemo kroz primjenu u prijemu podataka s radiosondi gdje ćemo se dotaknuti teme o konfiguraciji SDR-a i specifičnim softverskim alatima za dekodiranje signala radiosondi u SDR-u. I za kraj dotaknuti ćemo se teme o ograničenjima i tehničkim izazovima u primjeni SDR tehnologije.

### 2.2.1. SDR Modeli

Na tržištu trenutno postoji mnogo opcija što se tiče SDR modela, u nastavku proći ćemo kroz neke koji su najpopularniji za prijam meteoroloških podataka od radiosonda [13]:

- **RTL-SDR:** ovaj [14] SDR prijamnik je najpopularniji i najpristupačniji na tržištu jer je relativno niske cijene i jednostavan je za korištenje. Ovaj SDR prijamnik je zapravo modificirani USB TV prijamnik, vidljiv na slici 2.4, te zbog svoje pristupačnosti stoji nekoliko desetaka dolara što je idealno za amatere i početnike. Ova vrsta prijamnika obično pokriva frekvencije od 24 MHz do 1.7 GHz čime je pokriven spektar radio signala koje emitiraju radiosonde. Također ovaj SDR je kompatibilan s različitim softverskim rješenjima poput SDR# čime se omogućuje prijem i dekodiranje signala. Ovaj model nema mogućnosti emitirati signale.



**Slika 2.4:** Izgled RTL-SDR modela. S jedne strane ima ulaz za USB, dok sa druge strane ima priključak za antenu

- **HackRF One:** Još jedan jako popularan SDR prijamnik, frekvencijski opseg mu je 1 MHz do 6 GHz što omogućava rad i prijem gotovo svih vrsta radio frekvencija koje su relativne za radio komunikacije, tj. u našem slučaju omogućuje prijem signala radiosonda. Ovaj prijamnik također podržava poludupleks operaciju, a to znači da može primati ili emitirati signale, no ne oboje istovremeno. Ove karakteristike čine ga korisnim za istraživačke svrhe.
- **LimeSDR:** ovaj SDR model je napredniji od već spomenuta dva modela jer omogućuje full-duplex operacije te je prigodan za profesionalne svrhe kao i za istraživačke svrhe.

### 2.2.2. Primjena SDR-a u prijemu podataka radiosondi

Software-Defined Radio tehnologija je koja je unaprijedila mogućnost obrade, analize i primanja radio signala omogućujući korisnicima da primaju i dekodiraju različite vrste radio signala te da lako i jeftino mogu modificirati postojeći hardver bez potrebe za zamjenom cijelog modela ili njegovih komponenti. U domeni radiosondi SDR tehnologija pružila je veliku sposobnost prilagodbe i fleksibilnost.

Da bi se SDR mogao koristiti za prijem podataka koje radiosonde emitiraju, prvo je potrebno pravilno konfigurirati prijamnik i softver za naše potrebe [15]. Kako radiosonde inače emitiraju podatke na VHF (Very High Frequency) i UHF (Ultra High Frequency) rasponima, najčešće se SDR prijamnik konfigurira na frekvencijama od 400 MHz do 406 MHz, te oko 1680 MHz. Kako bi SDR mogao primiti signal mora biti postavljen na točnu frekvenciju. Ovo konfiguriranje SDR prijamnika moguće je putem softverskih rješenja sa sučeljem poput SDR# ili GNURadio. Konfiguriranje frekvencije također uključuje i izbor širine pojasa prijema koja mora biti dovoljno široka da obuhvati cijeli signal radiosonde, no opet širina pojasa ne smije biti preširoka kako bi se izbjegle smetnje drugih izvora.

Nakon što smo konfigurirali frekvenciju i širinu pojasa potrebno je podesiti brzinu uzorkovanja signala [15]. Pomoću brzine uzorkovanja signala može se odrediti koliko često SDR prijamnik uzorkuje dolazni signal. Što je brže uzorkovanje prijamnika to je veća rezolucija signala, ali to povlači da je za obradu tog signala potrebno više računalnih resursa. Vrlo je važno balansirati brzinu



uzorkovanja i slobodne računalne resurse kako bi dobili učinkovitu obradu signala. Sada kada smo konfigurirali brzinu uzorkovanja dolazi na red konfiguracija vrste modulacije za prijenos podataka. Najčešće se koriste amplitude modulation (AM), frequency modulation (FM) ili čak phase-shift (PSK). Ove konfiguracije su iznimno važne kako bi pravilno ekstrahirali iz signala podatke radiosonda.

Zadnje što je potrebno konfigurirati je protokol za dekodiranje podataka, radiosonde koriste specifične protokole za prijenos meteoroloških podataka i o tome ćemo u budućem potpoglavlju detaljnije. Protokol mora biti dobro podešen kako bi se podaci ispravno dekodirali i kako bi se dalje mogli koristiti za analizu, obradu i spremanje.

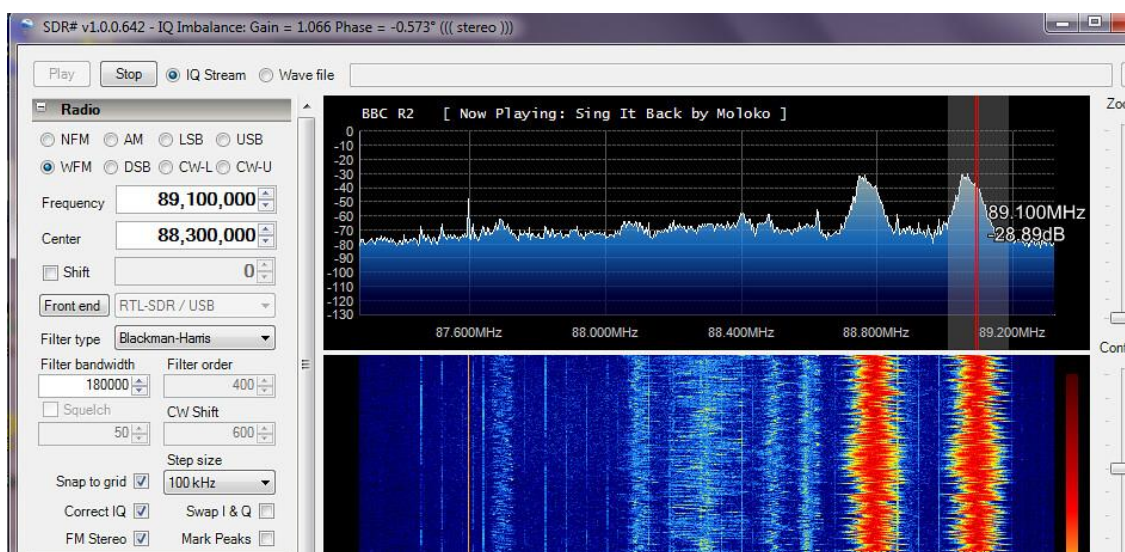
### **2.2.3. Softveri za dekodiranje signala radiosondi pomoću SDR-a**

Kako bi konfigurirali SDR-ove, na odgovarajuće parametre spomenute u prethodnom poglavlju, za primanje signala radiosonda potrebno je odabrati softver koje je kompatibilan s našim SDR modelom. U nastavku ćemo detaljnije istražiti neke od najpopularnijih softverskih alata koji se koriste u kombinaciji sa SDR-om za uspješno dekodiranje signala radiosonda.

SondeMonitor [16] je jedan od najpoznatijih softverskih alata namijenjenih praćenju i dekodiranju podataka s radiosonda. Ovaj softver je dizajniran za jednostavnu upotrebu, te nudi korisnicima mogućnost praćenja atmosferskih podataka u stvarnom vremenu. Ovaj softver je kompatibilan s mnogim modelima radiosonda, kao što su Vaisala RS92 i RS41 čime se smatra pogodnim za širok raspon primjera. Jedna od najvećih prednosti SondeMonitor softvera je to što omogućava brzo postavljanje i konfiguraciju. Početnici, a i drugi korisnici mogu jednostavno odabrati frekvenciju na kojoj radiosonda emitira, a softver će automatski sam dekodirati signal i prikazivati podatke u stvarnom vremenu. Nadalje moguće je pregledavati podatke u različitim razdobljima jer SondeMonitor omogućuje pohranu dekodiranih podataka za kasniju analizu. Također uz to omogućuje i vizualizaciju dobivenih podataka što olakšava meteorološkim profesionalcima brzu analizu i interpretaciju dobivenih atmosferskih uvjeta u stvarnom vremenu.

SDR# (SDRSharp) [17] je popularan open source softver za rad sa SDR prijamicima, što uključuje i širokokorištene modele poput prije navedenih RTL-SDR modela i HackRF One modela. Ovaj softver omogućuje niz funkcionalnosti za analizu signala i može ga se još dodatno proširiti s plugin-ovima kako bi se omogućilo dekodiranje signala radiosonda. Najznačajniji plugin u kontekstu radiosonda je RS41 Tracker plugin jer omogućuje dekodiranje signala od Vaisala RS41 radiosonda, koje su zapravo jedne od najčešćih radiosonda korištenih u meteorološkim istraživanjima. RS41 Tracker omogućuje korisnicima da jednostavno konfiguriraju parametre SDR-a, kao što je vidi na slici 2.5, i da prate parametre atmosfere na grafičkom sučelju u stvarnom vremenu. Još valja napomenuti da SDR# ima napredne mogućnosti analize signala kao što je spektralni prikaz i identificiranje smetnji. Iako je ovaj softver tehnički kompliciraniji od SondeMonitor softvera, SDR# je fleksibilniji i moguće ga je proširiti sa plugin-ovima pa je zato smatran jednim od najmoćnijih alata za rad sa SDR prijamicima.

RS41 Tracker [18] je specifičan softver za dekodiranje podataka od Vaisala RS41 radiosonda. Kao i ostali softveri omogućuje korisnicima da prate i dekodiraju podatke u stvarnom vremenu, te nudi mogućnost pohrane i analize povijesnih podataka. Prednost ovog softvera je što je specijaliziran za jedan tip radiosonda, što omogućava precizno dekodiranje i interpretaciju podataka, ali to također znači da je manje fleksibilan od prethodna dva softvera. Neovisno o tome, za istraživače i amatere koji se fokusiraju na RS41 radiosonde, RS41 Tracker nudi najbolje mogućnosti i pouzdanost.



**Slika 2.5:** Izgled SDR# grafičkog sučelja. Vidljivo je na lijevoj strani na traci da je moguće podešavati modulaciju, frekvenciju, širinu pojasa, brzinu otipkavanja i slično. Također vidljivo je da je moguće odrediti model SDR-a (U ovom slučaju RTL-SDR)

#### **2.2.4. Izazovi i ograničenja SDR-a**

Već smo prilikom usporedbe s tradicionalnim radio prijamnicima govorili o prednostima SDR tehnologije, no nismo se dotakli nekih ograničenja i nedostataka SDR tehnologije. Jedan, možda očit nedostatak je to što je kvaliteta prijema niža u usporedbi s tradicionalnim specijaliziranim prijamnicima [29]. To dolazi do izražaja u uvjetima gdje ima puno šuma ili kada je signal slab, pa SDR prijarnici mogu imati problema u održavanju stabilnog prijema. Nestabilan prijem može utjecati na točnost primljenih podataka. U urbanim područjima gdje ima mnogo elektromagnetskih smetnji, SDR može imati problema s razlikovanjem korisnog signala od šuma. Ovo ograničenje može utjecati na korištenje ove tehnologije u projektima i aplikacijama koje zahtijevaju visoku pouzdanost primljenih podataka kao što su profesionalne meteorološke stanice ili čak u vojne tj. sigurnosne svrhe.

Također smo rekli da je postavke SDR prijarnika potrebno konfigurirati softverski i potrebno je konfigurirati dekodiranje signala što zahtjeva određenu razinu tehničkog znanja. Iako postoje softveri koji ne zahtijevaju veliku razinu tehničkog znanja iz radio komunikacija, neki od njih mogu predstavljati značajan problem novim korisnicima s malo iskustva.

Nadalje, još jedan izazov SDR tehnologije je to što je najčešće potrebno puno procesorske snage da bi se obradili podaci u stvarnom vremenu. Moderna računala uobičajeno nemaju problema s procesorskom snagom, no zahtjevi za procesorskom snagom mogu postati problematični kada je potrebno obrađivati složene signale ili kada istodobno primamo više signala. Ovaj problem dolazi do izražaja kada se SDR koristi u kombinaciji s ugradbenim računalnim platformama s ograničenim procesorskim resursima kao što je Raspberry Pi ili neki sličan uređaj. Iako se SDR tehnologija često koristi u kombinaciji s ugradbenim računalnim platformama zbog niske cijene i malih dimenzija, procesorska snaga takvih platformi često nije dovoljna da se SDR koristi za složene projekte bez kompromisa performansi.

### **3. Prijenos i agregacija meteoroloških podataka**

Da bi se podaci od više radiosonda na drugim dijelovima svijeta mogli analizirati i agregirati potrebno ih je nekako prenijeti preko interneta i na neki način prikupiti. U ovom poglavlju bavit ćemo se cijelim prijenosom podataka od radiosonde pa sve do poslužitelja otvorenog koda. Također ćemo pogledati načine na koje se prenose podaci, što je modulacija te koja je njena uloga u prijenosu podataka meteoroloških radiosonda do prijamnika, kako prijamnici prepoznaju te signale te kako ih dalje distribuiraju do aplikacija za agregiranje meteoroloških podataka tj. kako se ti podaci distribuiraju do drugih radiostanica i slično. Također pogledat ćemo neke od najkorištenijih softvera koji se danas koriste da bi se telemetrijski podaci radiosonda mogli pročitati i slati na različite poslužitelje za agregaciju podataka.

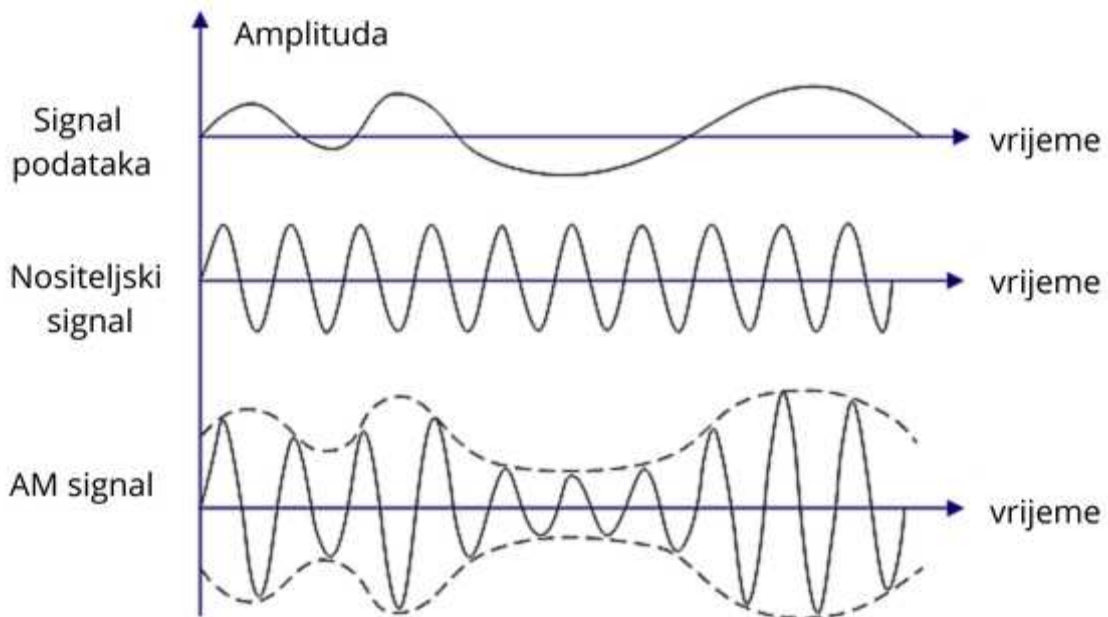
#### **3.1. Modulaciju podataka**

Kako bi se podaci prikupljeni radiosondama mogli poslati i stići do prijamnika potrebno je prvo modulirati signal. [22] Generalno u tehnici modulacijom se smatraju postupci kojim se neko svojstvo jedne fizičke veličine mijenja u skladu s promjenama druge veličine. U radiokomunikaciji, ali i općenito u telekomunikaciji modulacijom se prenose različiti podaci i informacije. Modulacija se izvodi tako da se jedan ili više parametara prijenosnog signala tj. nositelja mijenja podudarno s podacima koje želimo prenijeti predočenima modulacijskim signalom. U jednostavnim terminima modulacija je zapravo proces u kojem se naše korisne informacije „pakiraju” na nosivi signal tako da mogu putovati veće distance i biti otporniji na smetnje i sl. Bez modulacije naši signal za prienos bi bili ograničeni na kratke udaljenosti i niske frekvencije čime bi naše informacije bile izložene gubicima i greškama. Modulacija u radiosondama može biti digitalna ili analogna, ovisno o njenim potrebnim karakteristikama tijekom leta. U nastavku ćemo pogledati neke od najkorištenijih modulacija koje se koriste u radiokomunikaciji radiosonda.

### **3.1.1. Analogue vrste modulacije u komunikaciji radiosondi**

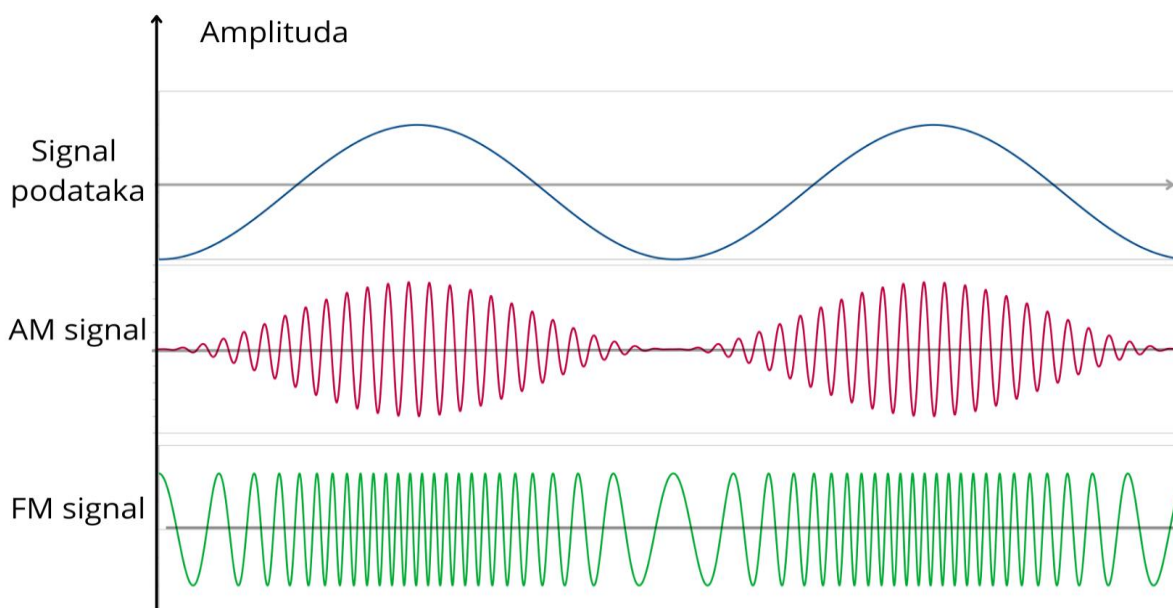
Postoje više vrsta analognih modulacija koje se koriste u komunikaciji i svaka od tih modulacija ima svoje prednosti i mane, te se koriste u različitim situacijama ovisno o potrebi. U ovom potpoglavlju proći ćemo kroz jednu stariju modulaciju koja se prije u povijesti koristila te ćemo proći kroz neke modulacije koje se danas koriste diljem svijeta za komunikaciju radiosonda.

Prva modulacija koju ćemo proći je amplitudna modulacija (eng. Amplitude Modulation) koja je jedna od najstarijih tehnika modulacije u povijesti te je ta tehnika modulacije bila korištena širom svijeta u ranim radiokomunikacijama. Kod amplitudne modulacije, amplituda nosivog signala varira u skladu s trenutnim vrijednostima modulirajućeg signala [30]. Ovo u suštini znači da se amplituda nosivog signala raste i pada u skladu s informacijom koja se prenosi kao što je vidljivo na slici 3.1. U povijesti ova vrsta modulacije je postala popularna u radiokomunikaciji jer je bila jednostavna za implementirati. Također amplitudno modulacijski prijammnici su jeftini i relativno jednostavni što je dodatno potaknulo raširenost ove tehnologije diljem svijeta. Međutim danas se ova vrsta modulacije rijetko koristi jer amplitudna modulacija ima nekoliko značajnih nedostataka kao što je osjetljivost na šum i smetnje. AM modulacija je osjetljiva na šum i smetnje jer bilo kakvi vanjski utjecaji koji mijenjaju amplitudu signala mogu uzrokovati izobličenja i gubitak kvalitete prijenosa. Unatoč svojim nedostacima amplitudna modulacija se još koristi u AM radio prijenosima, no zbog potrebe da se podaci mogu primiti s velikih udaljenosti, u radiosondama ova vrsta modulacije se ne koristi.



**Slika 3.1:** Prikaz kako AM signal izgleda te kako se kodiraju podaci u nositeljski signal da bi dobili AM signal.

Jedna od analognih modulacija koja se danas češće koristi i koja se primjenjuje u telekomunikaciji je frekvencijska modulacija (eng. Frequency Modulation). U frekvencijskoj modulaciji [23] frekvencija nosivog signala se mijenja ovisno o amplitudi modulacijskog signala. To znači da se informacija kodira kroz promjene u frekvenciji čime je FM puno otporniji na šum i smetnje od AM jer prijammnici ignoriraju promjene u amplitudi nosivog signala. Razlika između AM i FM vidljiva je na slici 3.2. Zbog otpornosti na šumove i smetnje ova vrsta modulacije je pogodna za komunikaciju na većim udaljenostima što je ključno za komunikaciju radiosonda jer su nerijetko radiosonde na velikim visinama i velikim udaljenostima.



**Slika 3.2:** Razlika između FM i AM signala, ako uzmemo da je nositeljski signal klasična sinusoida koja se nastavlja u „beskonačno”. Vidimo da FM signal ima povećanje u frekvenciji što je amplituda korisnog signala (signal podataka) veća, a da AM signal ima povećanje u amplitudi što je amplituda korisnog signala veća i obratno.

Još jedna ključna modulacija u današnje vrijeme koja se može koristiti za prijenos podataka radiosonda je fazna modulacija (eng. Phase Modulation). Ova vrsta modulacije mijenja fazu nosivog signala u skladu s trenutnom vrijednosti amplitude modulirajućeg signala, a amplituda i frekvencija nosivog signala ostaju konstantne [33]. Ova modulacija pruža najveću zaštitu od šuma i smetnji te također pruža mogućnost brzog prijenosa podataka. U kontekstu prijenosa podataka radiosonda ova modulacija je optimalna u odnosu na AM ili FM. PM prijarnici dizajnirani su tako da ne uzimaju u obzir promjene u amplitudi ili frekvenciji nosivog signala, fokusiraju se samo na promjene u fazi. Ova karakteristika daje faznoj modulaciji izrazitu otpornost na smetnje te joj također daje mogućnost prijenosa velikog broja podataka u kratkom vremenu. Unatoč ovim prednostima fazna modulacija je dosta tehnički zahtjevnija od FM i AM što dovodi do povećanja troškova i potrebe za kadrom ljudi koji imaju to tehničko znanje. Također može doći do velikih smetnji kada se faza nosivog signala može nepredvidivo mijenjati čime gubimo podatke.

### 3.1.2. Digitalne vrste modulacije u komunikaciji radiosonda

Kao što smo i prije rekli postoje i digitalne vrste modulacije koje se koriste u radiosondama. Digitalne modulacije omogućuju prijenos binarnih podataka kroz promjene jednog ili više parametara nosivog signala. U nastavku proći ćemo kroz nekoliko metoda za digitalnu modulaciju kao što su: BPSK (eng. Binary Phase Shift Keying), QPSK (eng. Quadrature Phase Shift Keying) i QAM (eng. Quadrature Amplitude Modulation)

Za početak krenimo s BPSK modulacijom koje je jedna osnovna, ali i učinkovita digitalna modulacija. BPSK funkcionira tako da se faza nosivog signala mijenja između dvije vrijednosti [31] (npr. 0 i 180 stupnjeva) kako bi se prenijeli binarni podaci. Zbog promjene faze između dvije vrijednosti ova metoda dopušta prijenos jednog bita po simbolu čime smo dobili vrlo robustan signal, posebno u okruženjima s mnogo šuma i smetnji. Zbog ove karakteristike ova metoda se koristi u situacijama kada nam je potreban pouzdan prijenos podataka čak i u okruženjima s mnogo šuma ili kada je signal slab. Zbog svoje jednostavnosti i robusnosti ova metoda digitalne modulacije je često korištena u meteorološkim radiosondama. Budući da BPSK modulacija prijenosi samo jedan bit po simbolu, ova modulacija nije pogodna za primjenu u situacijama kada nam je potreban prijenos velikih količina podataka u kratkom vremenu. Postoje naprednije digitalne modulacije u smislu prijenosa podataka kao što je sljedeća modulacija koju ćemo obraditi, a to je QPSK modulacija.

QPSK modulacija predstavlja poboljšanje u prijenosu podataka tako da QPSK koristi četiri različite faze (npr. 0, 90, 180 i 270 stupnjeva) nosivog signala za kodiranje podataka. Ovom promjenom u količini faza QPSK ima mogućnost za korištenje 2 bita po simbolu čime smo zapravo dobili poboljšanje u brzini prijenosa podataka [32]. Unatoč tome što je QPSK složeniji od BPSK, on pruža relativno dobar kompromis između otpornosti na smetnje i brzine prijenosa podataka, te također pruža učinkovitije iskorištavanje dostupnog spektra. Ovo znači da radiosonde koje koriste ovu modulaciju mogu prenijeti više podataka od radiosonda koje koriste BPSK bez povećanja širine pojasa. Prijamnici za QPSK modulaciju su složeniji od prijamnika za BPSK modulaciju jer trebaju moći



razlikovati četiri različite faze, no to ne igra veliku ulogu u primjenama gdje je potrebno prenijeti puno podataka bez povećanja rizika pogreške u prijenosu.

I za kraj o modulacijama ostaje nam još QAM koja je jedna od najsofisticiranijih metoda digitalne modulacije. U usporedbi s prijašnje dvije modulacije koje su mijenjale samo fazu nosivog signala, QAM mijenja i amplitudu i fazu nosivog signala kako bi se omogućilo kodiranje više bitova po simbolu [34]. Postoji više verzija QAM-a, no najosnovnija je 16-QAM verzija koja omogućuje prijenos četiri bita po simbolu jer se simbol predstavlja kao kombinacija 4 različite faze i 4 različite amplitude. Postoje i naprednije verzije koje omogućuju još veću brzinu prijenosa podataka kao što su QAM-64 i QAM-256. S povećanim brojem bitova po simbolu dolazi i veća kompleksnost prijamnika koji mogu demodulirati takav signal. Prijamnici moraju biti dizajnirani da precizno mogu odrediti i razlikovati različite kombinacije amplitude i faze. Uz veću kompleksnost prijamnika, QAM je uz to puno osjetljiviji na šum i smetnje od prethodne dvije modulacije. Meteorološke radiosonde mogu koristiti QAM za brzi prijenos podataka o vlažnosti, temperaturi i sl. u jednom signalu, no ako se odlučimo za tu vrstu modulacije potrebno je koristiti radiosonu u uvjetima gdje su šum i smetnje minimalne tj. u uvjetima gdje možemo imati kontinuiran i stabilan signal.

Dakle za standardne meteorološke radiosonde QPSK je češći izbor jer daje jako dobar kompromis između brzine prijenosa podataka i otpornosti na šum i smetnje, a i QPSK prijamnici su jednostavniji i jeftiniji. Također standardne meteorološke radiosonde su često u okruženjima s dosta smetnji i šuma te mogu proći velike udaljenosti što QPSK čini najoptimalnijim načinom modulacije. QAM se koristi češće u situacijama gdje uvjeti prijenosa mogu biti kontrolirani ili predvidljivi kao što je u nekim naprednijim aplikacijama ili znanstvenim istraživanjima.

### **3.1.3. Primjena modulacijskih tehnika kod meteoroloških radiosonda**

U ovom potpoglavlju sumirat ćemo priču o prednostima i izazovima analognih i digitalnim modulacijskih tehnika, koje smo naveli, te koje to implikacije ima na njihovu primjenu u meteorološkim radiosondama. Također ćemo pričati o

kombiniranju različitih modulacija za optimalni prijenos meteoroloških podataka dobivenih od radiosonda.

Prednosti analognih modulacija su:

- **Robusnost i pouzdanost:** analogni signali, poput FM i PM, pružaju visoku otpornost na smetnje i šum, a to je ključno za standardne meteorološke radiosonde jer se one nalaze u atmosferskim uvjetima gdje ima šuma i puno atmosferskih prepreka koje mogu rezultirati smetnjama.
- **Jednostavnost implementacije:** FM i PM modulacije ne zahtijevaju složene prijarnike za demodulaciju signala, a i same modulacije su jednostavne za implementaciju. Ovo svojstvo je idealno za meteorološke radiosonde jer one trebaju biti energetske učinkovite i pouzdane.

Izazovi analognih modulacija su:

- **Spektralna neučinkovitost:** Analogne modulacije su spektralno neučinkovite jer zahtijevaju širok frekvencijski pojas za prijenos podataka. Ovaj izazov onemogućuje njihovu primjenu u primjenama gdje je spektar ograničen
- **Sporija brzina prijenosa:** FM i PM modulacije inherentno su ograničene u brzini prijenosa podataka. U modernim meteorološkim radiosondama potrebno je prenijeti velike količine podataka što može predstavljati problem za analogne modulacije.

Sada kada smo se upoznali s izazovima, prednostima analognih modulatora i posljedicama koje ti izazovi i prednosti imaju na primjenu u meteorološkim radiosondama, obradit ćemo još isto i za digitalne radiosonde.

Prednosti digitalnih modulacija su:

- **Fleksibilnost:** pošto se digitalna modulacija izvodi digitalno moguće je prilagoditi tehniku digitalne modulacije dinamički. Ova prednost nam omogućuje da se dinamički mijenja način prijenosa podataka ovisno o uvjetima prijenosa. Ako znamo da su nam uvjeti nepredvidljivi i brzo promjenjivi (kao što je atmosfera) ova karakteristika je iznimno korisna.
- **Učinkovitost:** Digitalne modulacije su energetske učinkovitije prilikom prijenosa većih količina podataka iako zahtijevaju složeniju obradu od

analognih modulacija. Ova karakteristika je ključna za meteorološke radiosonde jer su radiosonde ograničene izvorima energije.

- **Brzina prijenosa:** digitalne modulacije kao što su QAM i QPSK omogućuju prijenos velikih količina podataka učinkovito. Ovo je ključno u današnjim radiosondama jer one prenose više informacija, kao što su GPS koordinate i druge specifične informacije, uz same osnovne podatke atmosferskih parametara

Izazovi digitalnih modulacija:

- **Složenost:** za dekodiranje i procesiranje signala nastalih digitalnom modulacijom potrebni su složeni sustavi za prijem signala. Zbog ove karakteristike potrebno je pažljivije projektirati i optimizirati sustav komunikacije radiosonda i prijarnika jer može doći do većih troškova i prevelike složenosti.
- **Relativna osjetljivost na smetnje:** lako ovo ne vrijedi za sve digitalne modulacije koje smo obradili, kod projektiranja potrebnih specifikacija za komunikaciju treba se odrediti kompromis između brzine prijenosa i otpornosti na šum i smetnje. Na primjer QAM ima izrazito veliku brzinu prijenosa podatak, no to plaća manjom otpornosti na šum. S druge strane imamo QPSK za koji ovaj izazov ne vrijedi.

Za kraj ovog potpoglavlja valjalo bi još spomenuti da u praksi meteorološke radiosonde mogu koristiti kombinaciju više modulacijskih tehnika kako bi se optimizirale potrebne karakteristike kao što su brzina prijenosa podataka i pouzdanost podataka. Na primjer moguće je kod meteoroloških radiosonda koristiti FM za prijenos osnovnih informacija poput tlaka, temperature, vlage i sl., a za prijenos dodatnih informacija koristiti QAM ili QPSK modulaciju.

Ovakvo kombiniranje više različitih modulacijskih tehnika, digitalnih i analognih, daje neke praktične prednosti prilikom prijenosa podataka kao što su:

- **Povećana fleksibilnost:** moguće se prebacivati između analognih i digitalnih modulacija ovisno o uvjetima atmosfere u kojima se nalazi radiosonda čime je dodatno povećana fleksibilnost

- **Sigurnost prijenosa:** ako jedna tehnika modulacije u nekom slučaju zakaže, moguće se prebaciti na ostale koje funkcioniraju te se time osigurava prijenos podataka i u slučajevima kada je došlo do kvara
- **Performanse:** Ovo je već spomenuto u uvodnom primjeru, no performanse se mogu značajno optimizirati kombiniranjem analognih i digitalnih modulacija za prijenos različitih podataka.

Iako svaka od ovih tehnika modulacije (analogna, digitalna ili kombinacija) donosi svoje prednosti i mane, prilikom odabira odgovarajuće tehnike prvo je potrebno odrediti uvjete i karakteristike potrebne za uspješnu komunikaciju. Kod meteoroloških radiosonda moguće su razne primjene i uvjeti pod kojima se radiosonde koriste. U nekim slučajevima potrebno je odašiljati samo osnovne informacije na velikim udaljenostima, a u drugim je potrebno odašiljati puno dodatnih informacija u kratkom periodu i kratkoj prostornoj udaljenosti što će rezultirati odabirom različitih modulacijskih tehnika za svaku od tih specifičnih potreba. Ovime smo zaključili da odabir modulacijske tehnologije kod meteoroloških radiosonda ovisi o specifikacijama i uvjetima pod kojima radiosonda radi.

### **3.2. Protokoli za prijenos meteoroloških podataka internetom**

Nakon što smo u prošlom poglavlju prošli kroz komunikaciju meteoroloških radiosonda s prijateljima, sljedeći korak u komunikaciji je komunikacija od prijatelja do drugih lokacija poput web stranica za agregiranje telemetrijskih podataka ili drugih radiostanica na Zemlji. U svrhu pouzdanog i učinkovitog prijenosa podataka internetom postoji nekoliko vrsta protokola čijim se korištenjem osigurava integritet, točnost i pravovremenost informacija tj. podataka. Ovisno o specifičnim zahtjevima prijenosa, različiti protokoli se koriste. Neki od tih zahtjeva su brzina prijenosa, količina podataka, sigurnosne potrebe i slično. U nastavku ćemo proći kroz neke od danas najkorištenijih protokola za prijenos meteoroloških podataka internetom.

### **3.2.1. HTTP/HTTPS protokol**

HTTP (eng. Hypertext Transfer Protocol) i njegova sigurnija verzija HTTPS (eng. Hypertext Transfer Protocol Secure) najkorišteniji je i najrašireniji protokol za prijenos podataka preko interneta. HTTP osnovni je oblik protokola te se koristi za prijenos hipertekstualnih podataka, dok HTTPS je sigurniji od HTTP jer koristi SSL/TLS enkripciju prilikom prijenosa podataka.

U kontekstu podataka radiosonda, mnoge meteorološke aplikacije koriste HTTP za pristup trenutnim ili povijesnim podacima. Neke aplikacije imaju API-je koje koriste HTTPS kako bi sigurno prenijeli podatke korisnicima. Ti podaci mogu biti korišteni za vremenske prognoze, u radarima i satelitskim slikama.

Neke od prednosti HTTP/HTTPS protokola su jednostavnost, sigurnost i skalabilnost. U smislu jednostavnosti HTTP/HTTPS je široko podržan u svim vrstama aplikacija, te je jednostavan za implementaciju. U smislu sigurnosti postoji sigurna verzija tog protokola (HTTPS) koja koristi SSL/TLS za enkripciju podataka tijekom prijenosa čime se onemogućuje neovlašten pristup i omogućena je zaštita od presretanja podataka. Što se tiče skalabilnosti ovaj protokol ima mogućnost prijenosa velikih količina podataka, a meteorološke aplikacije moraju upravljati s puno korisnika i podataka čime je ovaj protokol idealan za te svrhe.

### **3.2.2. FTP/FTPS protokol**

Kao i kod HTTP protokola, FTP (eng. File Transfer Protocol) protokol ima svoju originalnu verziju i sigurniju verziju. Osnovna namjena ovog protokola je prijenos datoteka između poslužitelja i klijenta od kuda dolazi i sam naziv za protokol. [19] FTP je protokol aplikacijskog sloja koji se na transportnom sloju oslanja na protokol TCP, a na mrežnom sloju na protokol IP. FTP komunikaciju uvijek započinje klijent sa slučajno odabranih mrežnih vrata (eng. port) na svojoj strani, dok se na poslužitelju koristi mrežna vrata 21. Ova vrata se koriste za kontrolu komunikacije i prijenos podataka. Kada poslužitelj prihvati komunikaciju s klijentom, klijent otvara port za primanje podataka na svojoj strani. Poslužitelj tada počne slati podatke s mrežnih vrata 20 do klijenta.

FTPS je proširenje na osnovni FTP protokol tako da omogućava šifriranje sjednica između klijenta i poslužitelja. Za zaštitu podataka koristi se SSL/TLS tehnologija čime se osigurava sigurnost podataka.

U meteorologiji FTP/FTPS se koristi za prijenos podataka tj. datoteka između raznih meteoroloških centara tj. raznih meteoroloških organizacija. Jedan realan primjer korištenja ovog protokola je kada meteorološke stanice trebaju distribuirati podatke o vremenskim uvjetima, satelitskim snimkama i predviđanjima. U suštini ovaj protokol je pouzdan jer omogućuje pouzdan prijenos velikih datoteka, također ima mogućnost sigurnosti tijekom prijenosa tako da se proširi sa SSL šifriranjem te kao i HTTP protokol i kompatibilan je s mnogim alatima i aplikacijama.

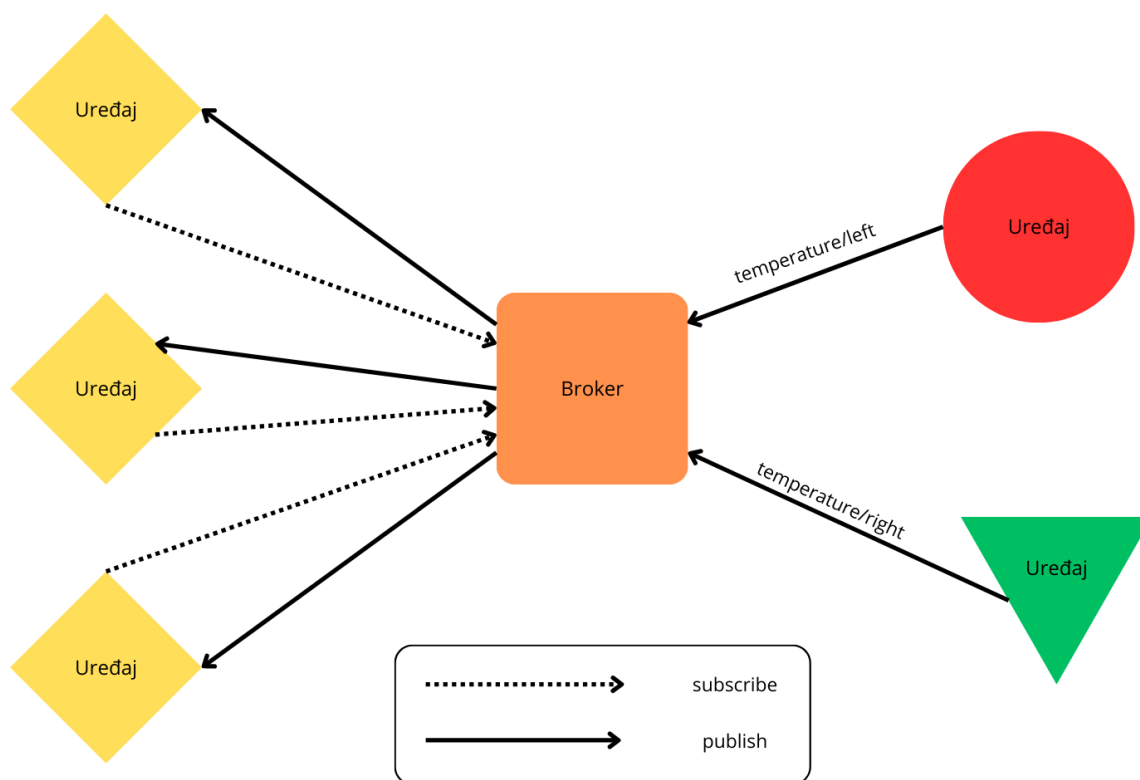
### **3.2.3. MQTT protokol**

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) [20] je protokol koji je osmišljen da bude efikasan, jednostavan za implementaciju te da troši malo energije za svoj rad. MQTT prvotno je nastao kao odgovor za specifičan problem nadziranja naftovoda u pustinji gdje je bila potreba za efikasnosti i jednostavnosti. Ideja iza ove tehnologije je bila u tome da se svi uređaji u nečijem posjedu povežu na internet kako bi se omogućila kontrola i nadzor svih uređaja od bilo gdje na svijetu, a da se kod takvih mreža komunikacija vrši bežično. MQTT protokol funkcionira na principu Publish/Subscribe. Taj princip je jednostavan zbog čega je ovaj protokol postao popularan pogotovo pri izradi amaterskih automatizacijskih sustava.

U suštini MQTT sastoji se od brokera i klijenata. Broker je drugi naziv za server te se na njega spajaju svi klijenti koji žele komunicirati s ostalim klijentima. Broker bi se mogao poistovjetiti sa pretplatom na neki časopis koji kad dođe novi časopis pošalje taj časopis svima koji su se pretplatili na njega. Znači zadaća MQTT servera je da prima poruke od svih klijenata koji su spojeni na njega te slanje tih poruka odgovarajućim klijentima koji su pretplaćeni. Danas postoji mnogi javni MQTT brokeri, a neki od njih su Hive MQ i Mosquitto. S druge strane imamo klijenta što je zapravo uređaj koji je pretplaćen na neku temu ili uređaj koji objavljuje na neku temu.

Osnovni koncept funkcioniranja MQTT protokola su teme i pretplate. Jedan primjer MQTT mreže je dana na slici 3.3. Svaka poruka koja stigne do brokera se šalje na određenu temu, a klijenti se mogu pretplatiti (eng. subscribe) na tu temu kako bi dobivali sve poruke koje stignu na tu temu. Teme nije potrebno konfigurirati već se one same kreiraju ako ne postoje. Poruke koje se šalju tj. primaju mogu definirati tri razine kvalitete usluge (eng. Quality of Service, QoS) s pomoću čega se definira razina provjere. Razine kvalitete usluge i opis kako se odvija komunikacija dane su u sljedećoj listi:

- **QoS 0** – poruka se šalje jednom do brokera bez potvrde
- **QoS 1** – poruka se šalje barem jednom s potvrdom o primitku
- **QoS 2** – poruka se šalje jednom, ali na način da se koristi četverostuko rukovanje za potvrdu o primitku



**Slika 3.3.:** Primjer MQTT mreže gdje sva komunikacija ide preko brokera, dok se ostali uređaju mogu pretplatiti na temu (uređaji označeni rombom) i također mogu poslati poruke na određenu temu (uređaji označeni s krugom i trokutom).

Što se tiče sigurnosti MQTT, kako bi ostao efikasan i brz, ne koristi sam po sebi neki način zaštite pa je ranjiv na *Man in the middle* napade, no kako bi se takve situacije izbjegle moguće je koristiti TLS/SSL protokol za ispostavljanje sigurne komunikacije.

### **3.2.4. Alternativa internet protokolima – APRS sustav**

Iako se u današnje doba najčešće koristi internet kao način komunikacije i prijenosa podataka, u svijetu prijenosa telemetrijskih podataka dobivenih od radiosonda postoje specifični slučajevi kada je potrebno koristiti alternative internetu. Jedna od najkorištenijih i najzanimljivijih alternativa je APRS (eng. Automatic Packet Reporting System) koji pruža robustan, učinkovit i pouzdan način prijenosa podataka u područjima gdje nema interneta ili gdje je pristup internetu ograničen [35].

APRS je sustav za prijenos podataka putem radijskih frekvencija, a ne putem interneta tj. njegovih protokola. APRS je postao popularan u meteorologiji i amaterskom radiju jer su se za prijenos podataka mogle koristiti radioamaterske mreže i radio stanice bez potrebe za internetskom vezom.

Kada radio stanica na zemlji primi signal od radiosonde, podaci se na prijarniku prvo obrađuju i dekodiraju kako bi dobili korisne podatke, a zatim se pakiraju u format koji je prikladan za prijenos putem radio veza. APRS koristi AX.25 protokol koji se standardiziran za prijenos podataka u amaterskom radiju. Uz standardne podatke koje meteorološka radiosonda pošalje, u paketima koje APRS šalje još se dodaju informacije poput identifikacije stanice i drugih relevantnih podataka. Nadalje svi paketi šalju se radijskim frekvencijama do ostalih radio stanica koje podržavaju APRS komunikaciju. U praksi radio stanice koje podržavaju APRS komunikaciju su postavljene na strateška mjesta kako bi se pokrilo što više zemlje. Komunikacija između stanica može biti direktna ili može prolaziti kroz više stanica pa dok ne dođe do cilja. Nakon što je paket stigao do cilja, podaci se izdvajaju iz paketa i dalje obrađuju. Daljnja obrada ovisi od stanice do stanice. Neke stanice možda nemaju pristup internetu pa podatke pohranjuju lokalno ili prosljeđuju dalje, no ako stanica ima interneta moguće je podatke prenijeti na meteorološke servere tj. bilo gdje na internetu ih je moguće pohraniti ovisno o našim zahtjevima.



Kada se govori o APRS sustavu valja spomenuti i APRS-IT (eng. APRS Internet System) sustav koji je nastao kao nadogradnja na APRS sustav. APRS-IT sustav bi nakon primitka signala radiosonde zapakirao podatke u APRS paket i poslao bi ih na APRS-IT servere putem interneta čime bi ti podaci postali dostupni na globalnoj razini na APRS-IT serverima. Znači nakon što bi podatak dospio na APRS-IT, taj podatak bi se dalje distribuirao putem interneta na povezane servere. Ovakva distribucija APRS paketa putem interneta omogućila je aplikacijama i platformama koje podržavaju APRS pakete da imaju pristup podacima u stvarnom vremenu, te je istraživačima i amaterima dopustila pristup APRS paketima putem interneta.

### **3.3. Postojeći softver za dekodiranje i slanje podataka radiosonda putem interneta**

U ovom poglavlju proći ćemo kroz jedan softvera otvorenog koda koji se koristi uz određene hardverske komponente kako bi se telemetrijski podaci dobiveni od radiosonda primili, dekodirali te poslali dalje na poslužitelje radi agregacije podataka. Postoji više vrsta softvera za dekodiranje i slanje podataka putem interneta, neke smo i prošli u prijašnjim poglavljima, gdje su neki više specijalizirani za neke tipove radiosonda, te uz to podržavaju samo određene poslužitelje za agregaciju podataka. Kako bi dobili dojam kako takvi softveri rade, proći ćemo kroz jedan od najkorištenijih softvera koji je otvorenog koda, a zove se dxIAPRS-SHUE.

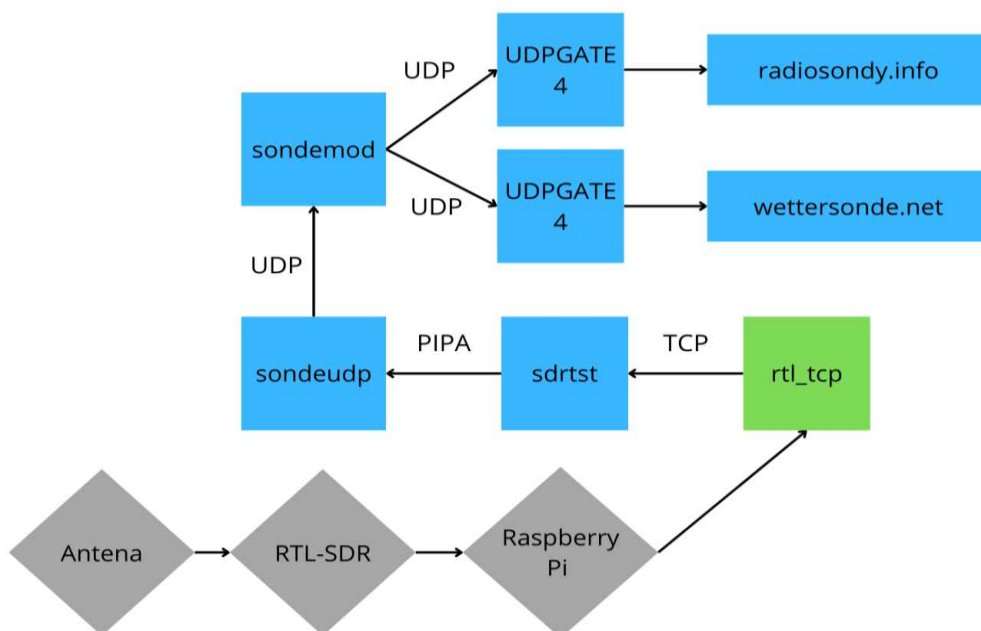
#### **3.3.1. DxlAPRS-SHUE**

Ovaj softver [21] otvorenog koda je zapravo ekstenzija na dxIAPRS softver, i ova ekstenzija dozvoljava slanje podataka na poslužitelj otvorenog koda SondeHub. Razlog tome je što ne podržava svaki softver da se telemetrijski podaci pošalju na određene baze podataka poslužitelja za agregaciju telemetrijskih podataka. Na primjer sam dxIAPRS softver je baziran na APRS-u te on dopušta da se podaci pošalju samo na APRS baze podataka tj. na servere koji podržavaju APRS pakete, ali ne i na SondeHub kod kojeg su telemetrijski podaci drugačije strukturirani. Iz tog razloga napravljena je ekstenzija koja dopušta da se podaci

moгу uspješno poslati i spremi na SondeHub poslužitelju za agregaciju podataka.

Da bi detaljnije razumjeli kako ova ekstenzija omogućuje da se podaci mogu poslati na SondeHub, proći ćemo kroz neke komponente softvera koje su ključne i koje su dio originalnog softvera. U svojoj srži dxIAPRS je takozvani lanac alata gdje svaki alat obavlja neku ulogu, a alati većinom komuniciraju jedni sa drugima putem UDP protokola.

Što se tiče hardvera ova radio stanica za prijem može biti vrlo jednostavna i jeftina i može se sastojati od Raspberry PI-a i RTL-SDR-a koji je povezan na antenu za primanje radiosignala. Sljedeći dijagram na slici 3.4 prikazuje kako jedna takva radiostanica izgleda te kojim redosljedom i kako ide komunikacija.

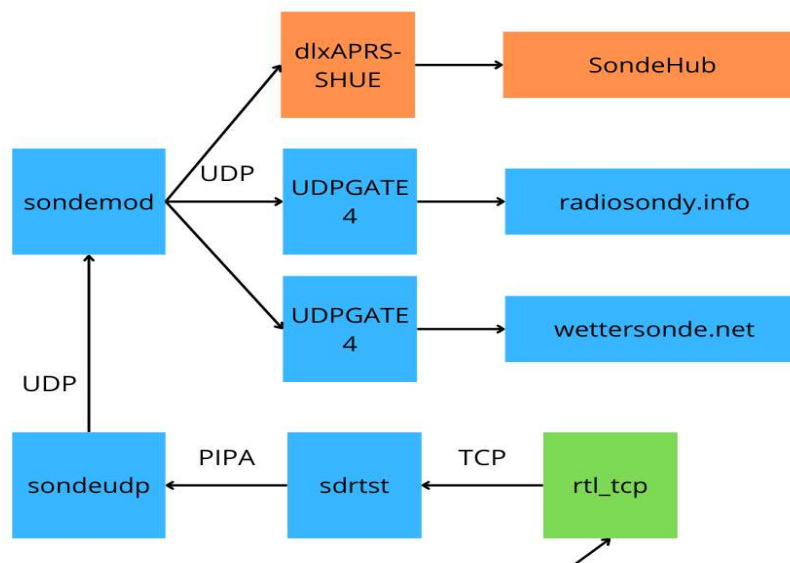


**Slika 3.4:** Prikaz blok dijagrama dxIAPRS softvera. Sivom bojom (rombovima) su označeni hardverski dijelovi. Zelenom bojom (rtl\_tcp) je označen softver koji je dio RTL-SDR prijmnika. Plavom bojom (kvadratima) su označeni dijelovi originalnog dxIAPRS softvera bez dxIAPRS-SHUE ekstenzije

Rtl-tcp nije dio dxIAPRS softvera nego je dio rtl-SDR hardvera te pruža SDR server za komunikaciju. Prva komponenta u komunikaciji i obradi je sdrstst alat. Ovaj alat ulazi u SDR server te kreira prijmnike koji dobiveni signal šalju na audio pipe koje sondeudp dobije. Sondeudp, alat nakon što primi signal s audio pipe,

dekodira ulazne signale i šalje dobivene podatke na sondemod alat. Sondemod alat pakira podatke u APRS pakete i dalje ih šalje na razne instance udpgate4 alata. Za kraj alatnog lanca imamo udpgate4 alat koji je zapravo APRS gateway koji će proslijediti pakete na APRS baze podataka kao što je radiosondy.info i wettersonde.net.

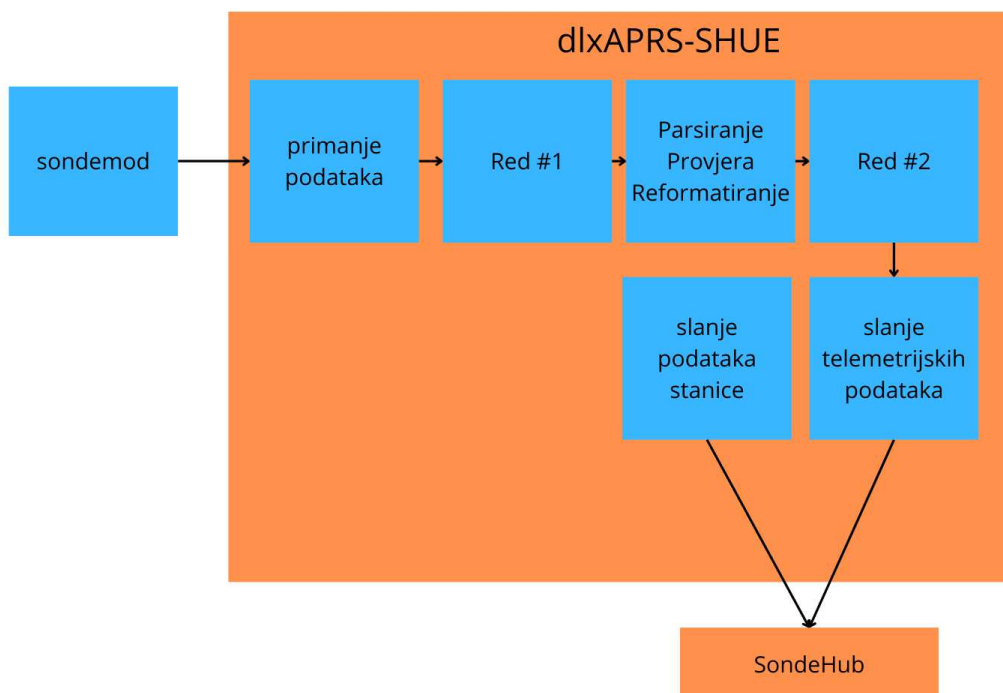
Sada kada smo vidjeli kako je originalni dxIAPRS softver funkcionirao te slao podatke valjalo bi još proći kroz dxIAPRS-SHUE ekstenziju koja omogućuje slanje podataka u JSON formatu na SondeHub. Sljedeća slika 3.5. prikazuje gdje se dxIAPRS-SHUE ekstenzija nalazi u dijagramu. Vidimo da ekstenzija dolazi poslije sondemod alata te da šalje podatke na SondeHub. DxlAPRS-SHUE ima dva moda za primanje podataka [21]. Prvi je da se koristi već standardni izlaz iz sondemod alata što znači da će SHUE ekstenzija primiti APRS pakete koje će dalje morati obraditi. Alternativno moguće je podesiti ekstenziju da prima podatke s UDP JSON izlaza koji sondemod alat ima integrirano.



**Slika 3.5:** Prikaz blok dijagrama softverskog dijela dxIAPRS alata i njegove dxIAPRS-SHUE ekstenzije koja omogućuje agregiranje podataka i slanje podataka na SondeHub poslužitelja. Vidimo da je dio obojan narančastom bojom novi dio (dio ekstenzije) u blok dijagramu s obzirom na sliku 3.4

Na slici 3.6 vidimo unutarnju strukturu dxIAPRS-SHUE alata. Taj alat započinje tako da sve pakete koje primi preko UDP-a spremi u red. Paketi u redu se obrađuju jedan po jedan tako da ih se prvo parsira, pa se nakon parsiranja provjeravaju neki moguće greške u formatiranju i slično, i tek nakon toga se podaci

reformatiraju da podržavaju format koji Sondehub poslužitelj prihvaća. Ti reformatirani podaci se ponovo stavljaju u red te čekaju da ih se pošalje na bazu podataka od Sondehub poslužitelja. Slanje tih podataka se događa u intervalima gdje se svi podaci, koji su trenutno u redu čekanja, pošalju odjednom. Postoji još jedan proces unutar dIxAPRS-SHUE alata koji radi neovisno o ostatku softvera, a to je dio koji periodično šalje na Sondehub poslužitelj podatke o stanici koja šalje podatke.



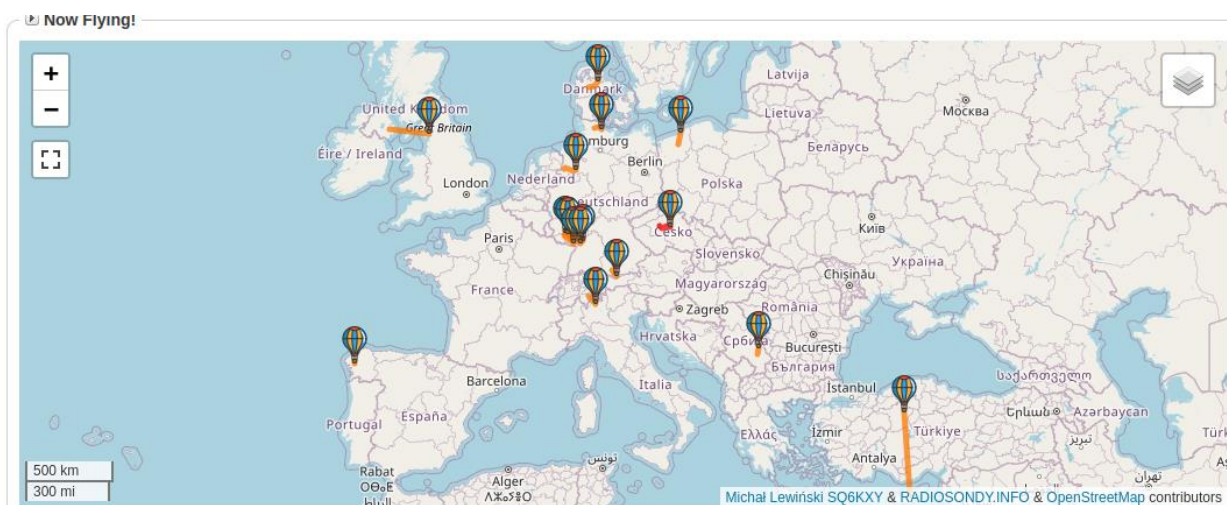
**Slika 3.6:** Prikaz blok dijagrama dIxAPRS-SHUE ekstenzije unutar dIxAPRS alata. Svaki proces unutar dIxAPRS-SHUE ekstenzije radi paralelno. Na slici vidimo da se uz periodično slanje podataka na SoneHub također periodično šalju podaci o stanici koja šalje podatke.

## 4. Poslužitelji za prikaz i agregaciju telemetrijskih podataka

U ovom poglavlju proći ćemo kroz neke web poslužitelje koji se koriste za primanje, prikaz i agregaciju telemetrijskih podataka dobivenih od meteoroloških radiosonda za mjerenja parametara atmosfere. Pogledat ćemo glavne značajke tih stranica, te što se sve nudi za prikaz i agregaciju telemetrijskih podataka. U današnje vrijeme postoji mnogo javno dostupnih stranica za praćenje i agregaciju telemetrijskih podataka, no mi ćemo u ovom poglavlju, radi jednostavnostim, proći kroz dvije takve stranice (jednu od kojih ćemo kasnije i probati prilagoditi i podići na vlastite poslužitelje).

### 4.1. Radiosondy

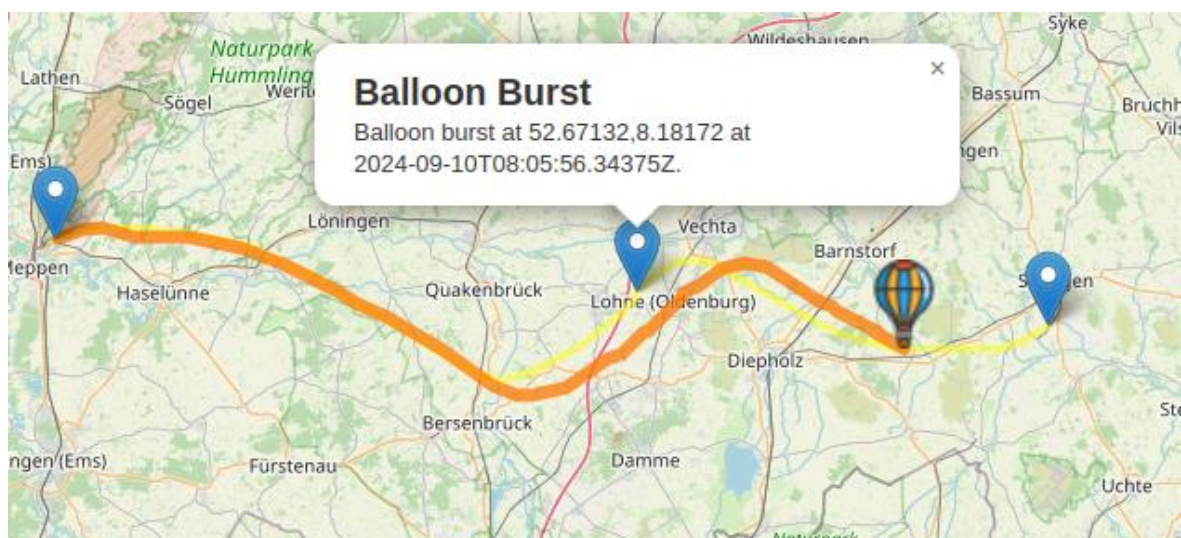
Prva javno dostupna stranica za agregiranje telemetrijskih podataka koju ćemo obraditi je zove se Radiosondy.info. Ova stranicu napravljena je kako bi se s pomoću već spomenutog APRS sustava, za praćenje telemetrijskih podataka u formatu APRS paketa, mogli pratili i agregirati podaci o meteorološkim radiosondama. Stranica se sastoji od karte svijeta, kao što se vidi na slici 4.1, koja omogućuje pregled meteoroloških radiosonda koje su trenutno u zraku.



**Slika 4.1:** Primjer pregleda meteoroloških radiosonda koje su trenutno u zraku na stranici Radiosondy.info

Također uz praćenje meteoroloških radiosonda uživo, moguće je vidjeti i njihove povijesne putanje tj. moguće je vidjeti put žive radiosonde od njenog lansiranja pa sve do trenutnog stanja radiosonde. Prikaz živih radiosonda na karti se ne ažurira automatski za sve radiosonde radi jednostavnosti implementacije i ograničenja tehnologije koja ta web stranica koristi. U praksi poslužitelji koji agregiraju i prikazuju telemetrijske podatke meteoroloških radiosonda dobivaju po tisuće i tisuće telemetrijskih podataka u minuti pa zbog toga imaju ograničenja na ažuriranje živih podataka. Radiosondy.info ipak ima mogućnost za praćenje i ažuriranje podataka i pozicije živih radiosonda na karti, no uz ograničenje da se može pratiti samo jedna živa meteorološka radiosonda u svakom trenutku. I ova značajka ima ograničenje na interval ažuriranja živih podataka, a trenutno je taj interval postavljen na 15 sekundi. Živi podaci pristižu s pomoću već spomenutog softvera dxIAPRS odnosno dxIAPRS-SHUE softvera, koji se može nalaziti na radioprijamnicima. Naravno postoji još drugih softvera koji omogućuju slanje telemetrijskih podataka na Radiosondy.info, ali dxIAPRS je jedan od najkorištenijih pa ostali nisu ni spomenuti.

Kada se na stranici odabere određena živa meteorološka radiosonda, dobi se prikaz već spomenutog živog prikaza koji se ažurira i dobi se prikaz predikcije putanje te radiosonde. Taj prikaz predikcije se izračunava u trenutku puštanja radiosonde te je moguće vidjeti od kuda je radiosonda puštena, gdje će balon od radiosonde puknuti te je također moguće vidjeti gdje će radiosonda pasti, kao što je vidljivo na slici 4.2.



**Slika 4.2:** Slika prikazuje praćenje jedne od živih radiosonda preko Radiosondy.info poslužitelja. Na slici se vide dvije putanje, jedna obojena narančasto koja prikazuje stvaran put meteorološke radiosonde, i druga obojena žuto koja prikazuje predikciju putanje koja je nastala na početku leta. Uz linije putanje i predikcije vide se i markeri koji prikazuju redom: početnu poziciju leta, poziciju gdje će balon radiosonde puknuti i poziciju gdje bi trebala radiosonda pasti na tlo.

Ove predikcije su sve samo ne savršene, ali služe svrsi i omogućuju lovcima na radiosonde da dobe generalni osjećaj gdje će radiosonda krenuti, a i u završnici gdje će pasti čime si olakšavaju traženje i praćenje.

Na stranici je moguće još vidjeti popis svih trenutno živih radiosonda s nekim osnovnim informacijama o njima kao što je serijski broj radiosonde, tip radiosonde npr. RS41 ili M10, te o podacima zadnjeg dobivenog paketa koja sadrži telemetrijske podatke te radiosonde. Uz zadnje žive podatke, moguće je još i pregledati sve meteorološke radiosonde koje su završile svoj let unazad 48 sati te je od svake te radiosonde moguće vidjeti cijeli put, gdje je započela s letom, gdje joj je balon stvarno puknuo i lokacija od kuda je zadnji paket primljen. Ako nas zanimaju podaci dobiveni od meteorološke radiosonde koja je završila let moguće je pregledati graf s podacima ili čak ako želimo dalje obrađivati podatke moguće je skinuti podatke na vlastito računalo.

Dodatno Radiosondy.info daje mogućnost pregleda samih predikcija leta, iz svih stanica za lansiranje, za radiosonde koje se lansiraju svakodnevno u točno određene sate te je također moguće skinuti povijesne podatke svih radiosonda koje su ikad bile praćene na toj stranici. Sve u svemu ova stranica za praćenje meteoroloških radiosonda prigodna je za sve amatere koji se žele baviti praćenjem radiosondi i njihovim podacima na osnovnoj razini jer su mogućnosti ove stranice ipak ograničene. Neke od ograničenja su da se svi živi podaci ne ažuriraju kako podaci pristižu, te jedno veće ograničenje je da web stranica ograničena na samo APRS pakete koje svi prijammnici ne šalju.

## 4.2. SondeHub

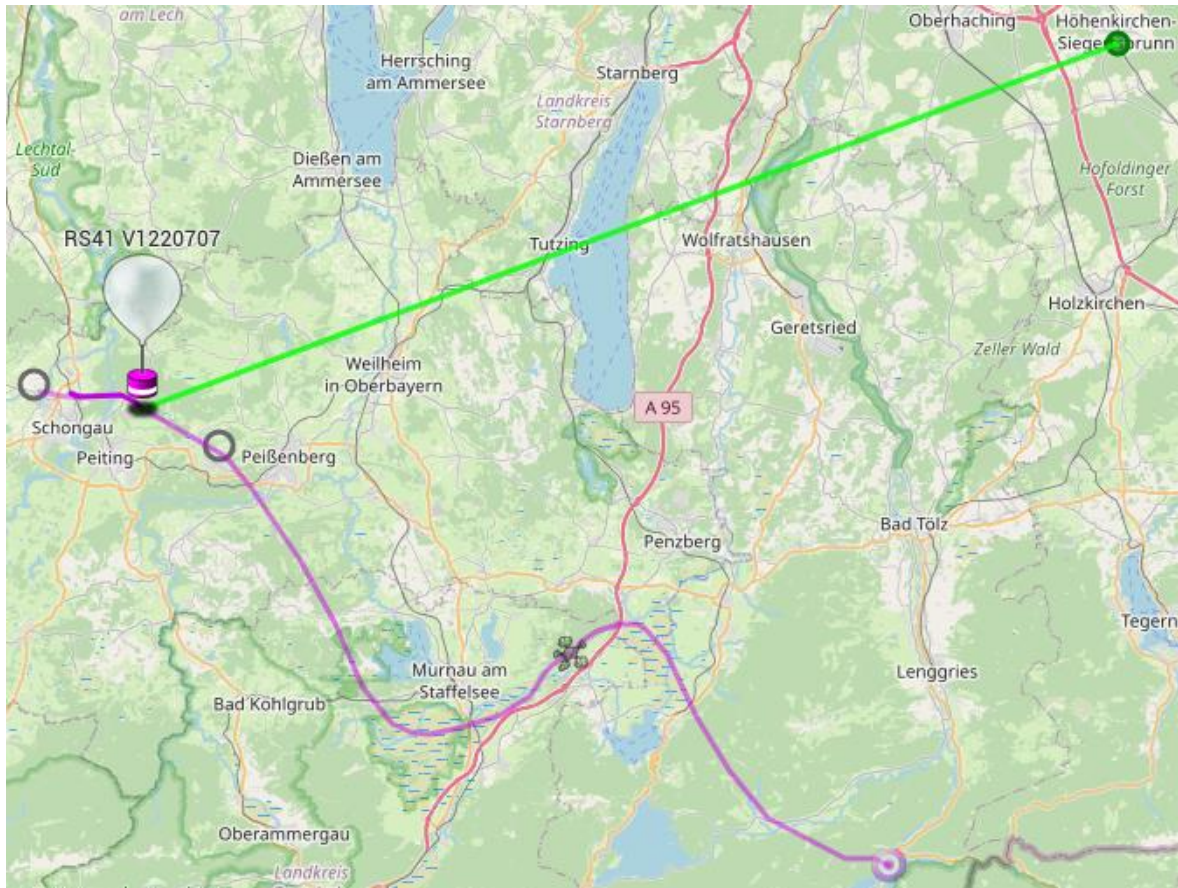
SondeHub je jedna od poznatiji web stranica za praćenje i agregaciju meteoroloških podataka kod amatera i kod znanstvenika. Ova stranica omogućuje praćenje puno više meteoroloških radiosonda jer podržava primanje telemetrijskih

podataka u JSON obliku koji je danas jedan od najpogodniji i najkorištenijih formata za prijenos podataka putem interneta. Kao i Radiosondy.info, SondeHub omogućuje praćenje živih balona na karti, ali uz to daje puno više mogućnosti i informacija na karti kao što je:

- Praćenje radiostanica koje prikupljaju i šalju podatke
- veći broj meteoroloških radiosonda koje se prate
- karta se ažurira kako dolaze živi podaci
- moguće živo praćenje više radiosonda odjednom
- predikcija leta s trenutne pozicije koja se svako malo ažurira

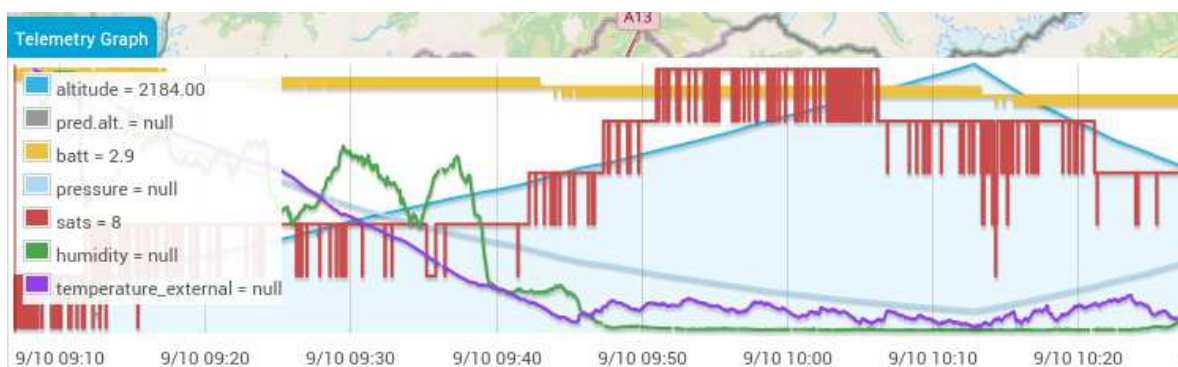
Također za svaku radiosondu, bilo živu ili već sletjeli, moguće je prikazati Skew-T graf koji meteorolozi koriste kako bi predviđali vrijeme, graf za svaku mjerenu varijablu telemetrijskih podataka i moguće je skinuti na vlastito računalo svaki pristigli paket koji je poslužitelj primio od radiostanica što čini SondeHub web stranicu jakim alatom za praćenje i prikupljanje podataka radiosonda. Na slici 4.3 vidimo kako sučelje za praćenje radiosonda izgleda na SondeHub poslužitelju te je odmah uočljivo kako ovaj poslužitelj daje puno više informacija o radiostanicama i radiosondama.





**Slika 4.3:** Primjer praćenja meteorološke radiosonde tipa RS41 sa serijskom oznakom V1220707 na SondeHub poslužitelju. Vidimo kako ovaj prikaz daje puno više informacija nego Radiosondy.info prikaz. Zelenom bojom označena je zadnja radiostanica koje je primila telemetrijske podatke od te određene radiosonde.

SondeHub još daje mogućnost za prikaz povijesnih letova do unazad 12 sati čime se mogu vidjeti zadnje pozicije radiosonda koje nisu i jesu pronađene za lakše traženje ili za dokumentiranje. Uz pregled Skew-T grafa, koji je amaterima težak za čitanje, postoji još jedan vremenski graf, prikazan na slici 4.4, koji prikazuje sve izmjerene podatke kroz vrijeme.



**Slika 4.4:** Primjer prikaza izmjerenih podataka jedne od radiosonda kroz vrijeme. Vidljivo je da je na x-osi vrijeme dok su na y-osi svi ostali parametri izmjereni tijekom leta.

Prolaskom miša preko grafa dobivamo točno određene vrijednosti u danom trenutku prikazane na legendi lijevo.

Što se tiče funkcionalnosti SondeHub ima veliku prednost nad Radiosondy.info poslužiteljem jer je tehnološki napredniji te daje puno više informacija i korisnih funkcionalnosti koje bi mogle biti interesantne amaterima i istraživačima. SondeHub također ima još jedan poslužitelj SondeHub Amateur koji se bavi samo amaterskim radiosondama, čime efektivno dajemo amaterima i istraživačima iste funkcionalnosti ali samo s drugim podaci.

## 5. Vlastiti poslužitelj za prikaz i agregaciju meteoroloških podataka

U ovom poglavlju bit će pokazano kako se može prilagoditi već postojeći SondeHub poslužitelj, za prikaz meteoroloških podataka radiosonda koje držimo i skupljamo na vlastitom API serveru. SondeHub je izabran zato što je otvorenog koda što znači da ga možemo prilagođavati vlastitim potrebama bez nepotrebnog programiranja cijele web stranice i njenog izgleda, a i uz to licenca dozvoljava da se softver slobodno koristi i modificira. Ući ćemo i u detalje i probleme koji proizlaze iz zahtjeva SondeHub poslužitelja i podizanja vlastitog API servera. U prvom potpoglavlju bit će pokazano kako za početak samo podići SondeHub poslužitelj na vlastitom računalu. Zatim ćemo pričati o zahtjevima koje trebamo ispuniti da bi mogli spojiti svoj API server na SondeHub poslužitelj čime bi mogli prikazivati vlastite telemetrijske podatke. Nakon toga dotaknuti ćemo se teme izgradnje vlastitog API servera za agregaciju telemetrijskih podataka. I za kraj govorit ćemo o limitacijama i problemima takvog vlastitog poslužitelja.

### 5.1. Podizanje SondeHub poslužitelja na vlastitom računalu

Kao što smo već rekli u prvom poglavlju govorit ćemo o procesu podizanja SondeHub poslužitelja na vlastitom računalu kako bi ga kasnije mogli modificirati za prikaz vlastitih podataka. Kod za SondeHub poslužitelj nalazi se na GitHub-u, u projektu nazvanim sondehub-tracker. Proces podizanja poslužitelja na vlastito računalo je jednostavan, te se sastoji od samo nekoliko koraka. Kako bi uopće mogli podići SondeHub server potrebno je imati instalirano Git, Javu i Python 3. Prvi korak je da se na vlastitom računalu pozicioniramo u praznu mapu na računalu s pomoću terminala te da u terminalu upišemo:

```
$ git clone https://github.com/projecthorus/sondehub-tracker.git
```

Nakon što smo uspješno klonirali potrebno je pokrenuti skriptu *build.sh* koja će nam omogućiti da preko Pythona pokrenemo *serve.py* poslužitelj na vlastitom računalu. Pokretanje skripte i servera na terminalu ide redom:

```
$ ./build.sh
$ python serve.py
```

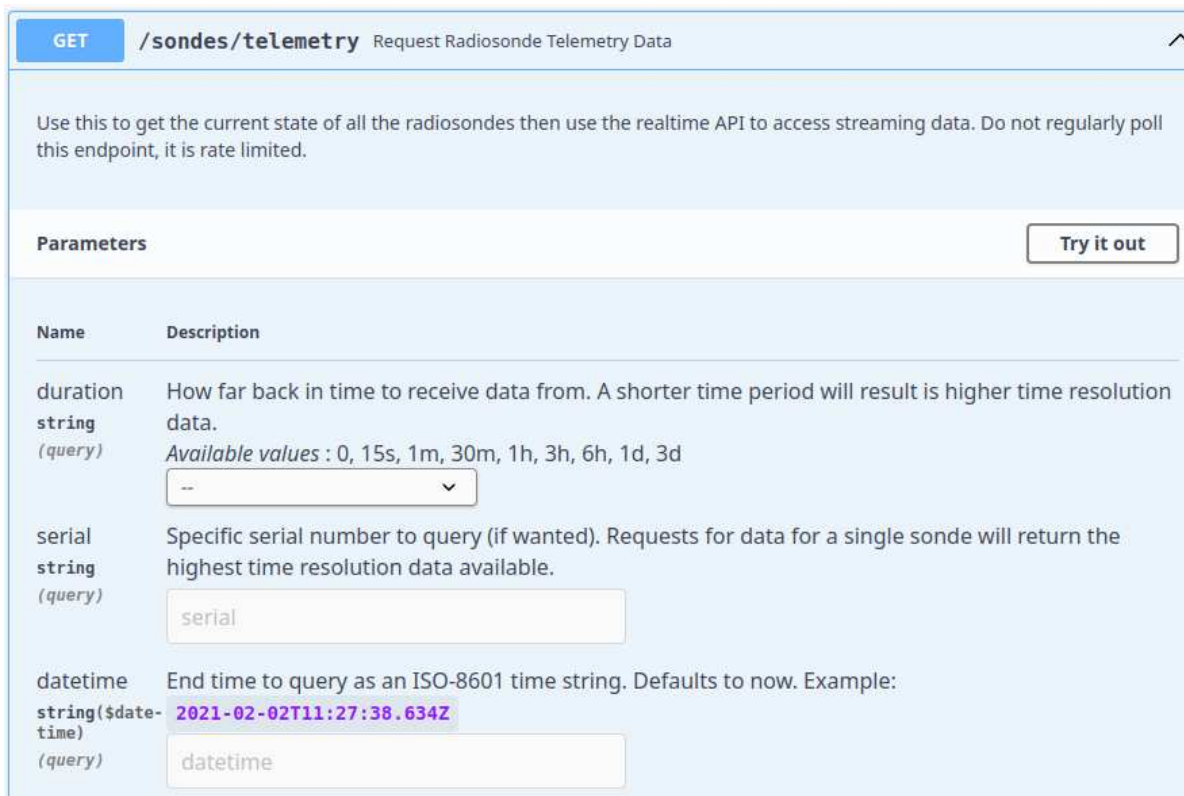
Ako su se ove dvije komande u terminalu uspješno izvršene trebali bi na internet pregledniku, na lokaciji <https://localhost:8000/>, moći vidjeti da se podigao naš vlastiti SondeHub poslužitelj, te bi također trebali primjetiti da poslužitelj i dalje ima pristup podacima kojima originalni SondeHub ima pristup. Već sad nam to govori da SondeHub poslužitelj dobiva podatke s nekog drugog servera te da je otvoreni kod za SondeHub poslužitelj većinom samo frontend te da se na njemu ne agregiraju podaci.

## 5.2. Modificiranje SondeHub poslužitelja

Kako bi naši podaci mogli stići do našeg vlastitog SondeHub poslužitelja trebamo prvo vidjeti kako uopće SondeHub dobiva telemetrijske podatke radiosonda. Pogledom u otvoreni kod SondeHub-a vidljivo je da je dohvaćanje telemetrijskih podataka razdijeljen na dva sustava. Prvi sustav koristi SondeHub API server kako bi dohvatio povijesne podatke o telemetrijskim podacima, a drugi sustav koristi MQTT server za dohvaćanje živih telemetrijskih podataka radiosonda.

### 5.2.1. Potrebne modifikacije za rad s vlastitim API serverom

Što se tiče modifikacija potrebnih za komunikaciju s vlastitim API serverom, dovoljno je u kodu SondeHub poslužitelja promijeniti varijablu *new\_data*, unutar *tracker.js* datoteke, da pokazuje na put do našeg API-a za telemetrijske podatke. Tu varijablu želimo promijeniti jer pogledom u dokumentaciju SondeHub API-a možemo vidjeti kako se dohvaćaju povijesni telemetrijski podaci. Slika 5.1 prikazuje Swagger dokumentaciju za SondeHub API i vidimo da je put za dobivanje telemetrijskih podataka */sondes/telemetry* te da je korijenski put API-a *api.v2.sondehub.org/*. Kombiniranjem korijenskog puta i puta za telemetrijske podatke dobivamo konačan put <https://api.v2.sondehub.org/sondes/telemetry>.



**Slika 5.1:** Prikaz SondeHub API dokumentacije preko Swagger-a. Na slici je vidljiv put do telemetrijskih podataka te su vidljivi dodatni argumenti koji se mogu nadodati na put kako bi imali veću fleksibilnost prilikom dohvaćanja telemetrijskih podataka.

Originalno *new\_data* varijabla sadrži putanju do SondeHub API-a za dohvaćanje telemetrijskih podataka koja je: <https://api.v2.sondehub.org/sondes/telemetry>, no ako želimo dobivati vlastite podatke moramo promijeniti put da pokazuje na put do naših telemetrijskih podataka. U vlastitoj implementaciji API servera, put do telemetrijskih podatak je <https://sondehubapi-eceb35da85f7.herokuapp.com/api/sondes/telemetry/>. Više o ovome bit će obrađeno u kasnijem potpoglavlju kada ćemo govoriti o podizanju vlastitog API servera.

U datoteci *tracker.js* postoji još nekoliko varijabli s putevima do SondeHub API-a, no ti putevi se koriste za dohvaćanje raznih podataka koji nas trenutno ne zanimaju poput podataka o lansirnim stanicama, radioprijamnicima i sl.

## 5.2.2. Potrebne modifikacije za rad s MQTT serverom

Za omogućivanje naših živih telemetrijskih podataka potrebno je modificirati MQTT konekciju da se spoji na naš vlastiti MQTT server. Za konekciju na MQTT server

potrebno je odrediti port na koji ćemo se spojiti, URL MQTT servera, protokol za prijenos podataka te naziv klijenta koji se spaja. U kodu SondeHub poslužitelja ti parametri za konekciju nalaze se unutar tracker.js datoteke i izgledaju ovako:

```
var livedata = "wss://ws-reader.v2.sondehub.org/";
var clientID = "SondeHub-Tracker-" + Math.floor(Math.random()
* 10000000000);
var client = new Paho.Client(livedata, clientID);
```

*Livedata* varijabla u sebi sadrži cijeli put do MQTT servera, protokol i port. *wss* označava WebSocket Secure protocol, a port nije označen jer se koristi već predefinirani port 8884. Ostatak *livedata* varijable je URL MQTT servera. *ClientID* je varijabla koja nasumično kreira ime klijenta kako ne bi došlo do kolizije imena klijenata. I za kraj nam je ostala *client* varijabla koja kreira objekt sa svim parametrima potrebnim za uspostavljanje veze s MQTT serverom.

U vlastitoj modifikaciji korišten je postojeći MQTT server, koji se zove HiveMQ. Iskorišten je radi jednostavnosti i zbog toga što je besplatan za korištenje pa nema potrebe za podizanjem vlastitog MQTT servera. Jedino je potrebno promijeniti URL MQTT servera i port servera kako bi mogli raditi s našim vlastitim živim podacima. Za to moramo promijeniti *livedata* varijablu u:

```
var livedata = "wss://broker.hivemq.com:8884/mqtt";
```

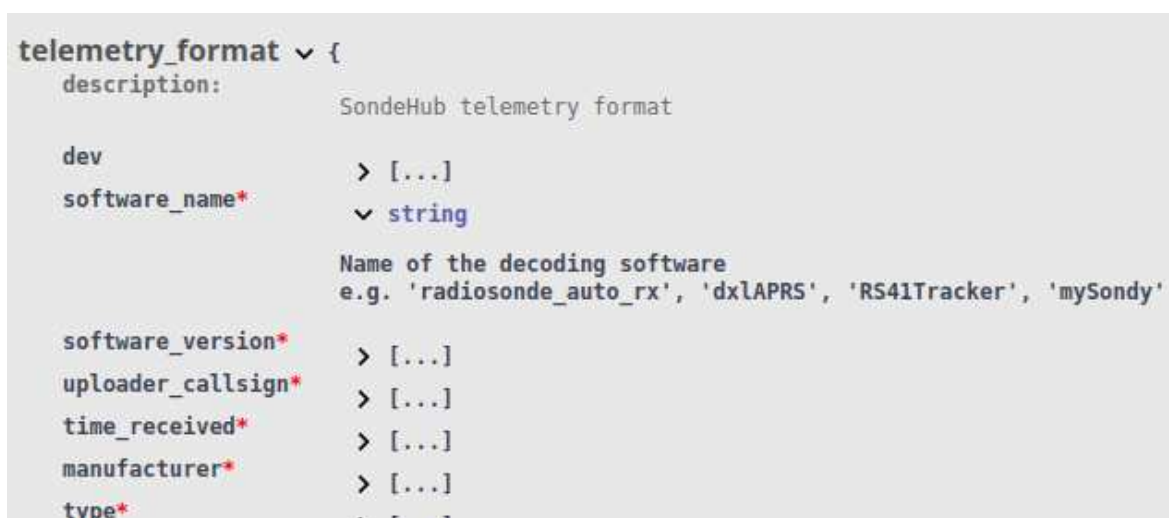
Ovdje se sad vidi da se koristi port 8884 za *wss* konekcije iako ga nije potrebno navesti jer se već podrazumijeva kao standardni port. S ovime smo završili sa svim promjenama potrebnim na SondeHub poslužitelju otvorenog koda da može raditi s vlastitim telemetrijskim podacima.

### **5.3. Podizanje vlastitog API servera za agregaciju telemetrijskih podataka**

Za implementaciju vlastitog API servera koristio sam Django i Django-API biblioteke koje se baziraju na Python programskom jeziku. Django je moćan alat koji dopušta jednostavno kreiranje servera, zbog čega je u ovom radu i odabran. Za podizanje API servera na internet korišten je Heroku s pomoću kojeg se besplatno i jednostavno može podignuti server, no cijena će imati utjecaja na performanse o čemu ćemo kasnije.

### 5.3.1. Spremanje telemetrijskih podataka radiosonda

Kako bi vlastiti API server uopće bio kompatibilan s našim vlastitim SondeHub poslužiteljem, a i s originalnim SondeHub poslužiteljem trebam prvo razumijeti format u kojemu telemetrijski podaci dolaze i format za spremanje telemetrijskih podataka u originalnom API serveru. Za to nam opet pomaže Swagger dokumentacija u kojoj možemo pregledati sve potrebne formate. U Swaggeru je moguće pregledati model koji se koristi za spremanje telemetrijskih podataka kao što je vidljivo na slici 5.2. Uz pomoć dokumentacije modela u Django je lagano implementirati takav jedan model te ga dalje koristiti za upotrebu.



**Slika 5.2:** Prikaz dokumentacije formata modela za telemetrijske podatke. S lijeve strane su poredani atributi koje taj model treba imati i također su dodane zvjezdice pored atributa koji uvijek moraju biti prisutni prilikom spremanja telemetrijskih podataka u model. S desne strane svakog atributa prikazani su tipovi podataka koje ti atributi spremaju. Na primjer atribut `software_name` je uvijek potreban te su podaci tipa `String`.

Sada kada smo u Django implementirali model telemetrijskih podataka moramo još i implementirati API putanju za spremanje telemetrijskih podataka. Ponovnim pogledom na dokumentaciju, specifično pogledom na HTTPS PUT zahtjev (isti URL kao i za dohvaćanje telemetrijskih podataka) vidimo da u zahtjevu mogu biti dvije *header* vrijednosti. Prva vrijednost je *Date*, koja u sebi treba sadržavati vrijeme slanja podataka u formatu UTC RFC7231, je obavezna. Druga vrijednost je *User-Agent* u koju se unosi naziv i verzija softvera koji šalje podatke. Nadalje u tijelu zahtjeva treba biti lista telemetrijskih podataka (u formatu modela) radiosonda koji se šalju.

U vlastitoj implementaciji HTTPS PUT zahtjeva prvo je napravljeno parsiranje i validacija svih telemetrijskih podataka iz zahtjeva, a zatim se ti podaci svi u komadu spremaju u bazu podataka koja je realizirana s pomoću već ugrađene SQLite3 baze podataka. Sljedeći kod je isječak realizacije takve funkcionalnost:

```
for telemetry_data in request.data:
    telemetry_data['user-agent'] = user_agent
    serializer = TelemetrySerializer(data=telemetry_data)
    if serializer.is_valid():
        validated_data = serializer.validated_data
        telemetry_object = Telemetry(**validated_data)
        telemetry_objects.append(telemetry_object)
        response_data.append(validated_data)
    else:
        return Response(serializer.errors,
                        status=status.HTTP_400_BAD_REQUEST)
```

U *for* petlji prolazimo kroz svaki podatak u listi telemetrijskih podataka te ih s pomoću serijalizatora validiramo. Ako je podatak ispravnog formata podaci se spremaju u naš vlastiti model te se sve to zajedno sprema u listu kako bi kasnije mogli sve podatke odjednom spremiti u bazu podataka. U slučaju da jedan podatak nije ispravnog formata svi podaci će biti neuspješno spremljeni te će korisnik dobiti poruku o grešci.

Ako su svi podaci uspješno validirani i spremljeni sljedeći korak nam je povezivanje na MQTT server za koji smo već rekli da koristi HiveMQ server. Ovaj dio je jako važan ako želimo da nam se živi podaci šalju na SondeHub poslužitelj čim dođu novi podaci na vlastiti API server. To povezivanje izgleda slično kao i kod vlastitog SondeHub poslužitelja jer ima iste parametre pa se nećemo u detalje baviti time. Kada je konekcija uspostavljena prestaje nam još objaviti te podatke na određenim temama MQTT servera. U slučaju SondeHub poslužitelja teme na koje se njegov klijent pretplaćuje, a preko kojih dobiva uživo podatke, su sve teme koje počinju s prefiksom „sondes/” i završavaju s jednim od serijskih oznaka radiosonde. Na primjer kada odemo na vlastiti poslužitelj naš MQTT klijent će se spojiti na HiveMQ MQTT server te će se pretplatiti na sve radiosonde koje su u fokusu na karti. Recimo da je u fokusu radiosonda sa serijskom oznakom



V2350027, to znači da će se naš klijent pretplatiti na sondes/V2350027 temu čime efektivno dobivamo uživo podatke za tu sondu.

S obzirom na to kako se MQTT klijenti pretplaćuju na strani SondeHub poslužitelja, potrebno je na strani vlastitog API poslužitelja postaviti da klijent objavljuje na iste teme. To se može postići sljedećim kodom:

```
for telemetry_data in response_data:
    topic = f"sondes/{telemetry_data.get('serial')}}"
    message = telemetry_data
    publish_mqtt_message(topic, message)
```

U isječku koda prikazano je kako se u *for* petlji prolazi kroz svaki telemetrijski podatak te da se na temelju tog telemetrijskog podatka određuje tema (eng. topic) na koju će ti podaci biti poslani. Nakon određivanja teme naš MQTT klijent treba objaviti te podatke za tu temu što se postiže *publish\_mqtt\_message* funkcijom. U trenutku kada su svi podaci objavljeni na svojim temama još jedino što nam preostaje je zatvoriti MQTT konekciju između našeg klijenta i brokera te smo s time završili spremanje podataka i dio sustava koji je zaslužan za objavu (na vlastitom API serveru) i praćenje (na vlastitom modificiranom SondeHub poslužitelju) podataka meteoroloških radiosonda uživo.

### 5.3.2. Dohvaćanje telemetrijskih podataka radiosonda

Već smo vidjeli na slici 5.1 da URL za dohvaćanje ima dodatne parametre koji se šalju unutar URL-a, a to su: *duration*, *serial* i *datetime*. SondeHub ima tri kombinacije tih parametara koje su mu potrebne kako bi mogao funkcionirati tj. kako bi mogao dobiti odgovarajuće telemetrijske podatke putem HTTPS GET upita za normalnu funkcionalnost.

*Duration* parametar može poprimiti vrijednosti: 0, 15s, 1m, 30m, 1h, 3h, 6h, 1d, 3d. Te vrijednosti označavaju koliko daleko u povijest želimo dohvatiti telemetrijske podatke. 0 označava da želimo samo podatke koji pristižu uživo dok 3d znači da želimo dohvatiti podatke unazad 3 dana. *Serial* parametar nam govori za koju točno meteorološku radiosondu želimo podatke tako da upišemo serijsku oznaku radiosonde. Treći i zadnji parametar je *datetime* pomoću kojeg se mogu dobiti malo detaljniji telemetrijski podaci radiosonde u određenom trenutku.

Prva kombinacija parametara je kada je samo *duration* postavljen, a ostali parametri nisu. Ovakva kombinacija se događa kada se tek učita web stranica pa naš vlastiti poslužitelj daje upit na API servera i kada mijenjamo interval povijesnih podataka, što je moguće preko sučelja na karti. Zbog ograničenih resursa i ogromnih količina podataka na vlastitom API serveru dozvoljeni su jedino upiti s intervalom do 10 minuta u povijest. Razlog tome je što u slučaju kada naš vlastiti API server prima isto podataka kao i originalni SondeHub, moguć je da se upit neće izvršiti zbog manjka računalnih resursa. Kako bi se to izbjeglo moguće je u budućnosti povećati resurse servera ili alternativno, filtrirati telemetrijske podatke samo određenih radiosonda koje dolaze na API servera kako bi se upiti ubrzali. Važno je napomenuti da se ovim upitom uzimaju zadnji telemetrijski podaci svih radiosonda unazad određenog intervala.

Druga kombinacija parametara koja se poziva s GET upitom u kodu SondeHub-a je kombinacija u kojoj jedino *datetime* nije postavljen. Koncept je sličan kao i kod prve kombinacije parametara samo što umjesto da uzimamo zadnje telemetrijske podatke radiosonda, uzimaju se telemetrijski podaci određene radiosonde unazad određenog vremena. Ovakav GET upit se događa kada na karti stisnemo neku radiosondu koja je u letu ili koja je već sletjela.

Treća kombinacija parametara je kada *duration* nije postavljen. GET upit s takvom kombinacijom jedino se šalje kada se na karti stisne linija puta radiosonde. Ovaj upit iz baze traži podatke o točno određenoj radiosondi u točno određeno vrijeme. Takvih podataka za točno određeno vrijeme i radiosondu može biti više jer isti podaci mogu doći od više radiostanica. Sva tri upita implementacijski nisu složena, no zahtijevaju različite formate podataka u odgovoru.

S ove tri kombinacije istog GET upita, ali sad drukčijim parametrima i s PUT upitom moguće je imati potpunu funkcionalnost vlastitog modificiranog SondeHub poslužitelja za prikaz meteoroloških podataka radiosonda koje držimo i skupljamo na vlastitom API serveru. Nakon implementacije API servera potrebno ga je još podići na Heroku kako bi bio javno dostupan. Postupak podizanja API servera na Heroku jednostavan je proces jer je Django kompatibilan sa njime te je potrebno samo napraviti besplatan korisnički račun i konfigurirati projekt po uputama s interneta. U ovom radu nećemo ulaziti duboko u sam postupak podizanja API servera, jer danas postoji puno mogućnosti kako to napraviti.

## 5.4. Podaci, limitacije i unaprijeđena

Kako bi uspjeli agregirati stvarne meteorološke podatke na našem SondeHub API-u, u ovom radu koristit ćemo Python skriptu sa SondeHubovim modulom koji omogućuje da dobivamo podatke kako oni uživo dolaze na originalni SondeHub API. Kod za čitanje dolaznih uživo podataka je:

```
import sondehub
...
sondehub.Stream(on_message=on_message, sondes=[sonde] if
sonde else ["#"])
```

Svaki puta kada originalni SondeHub primi meteorološke podatke, funkcija *on\_message* će se pokrenuti, a u njoj je logika da se ti podaci putem HTTPS PUT upita šalju na vlastiti API server. *On\_message* funkcija ima dodatan parametar *sondes* kojem možemo dati listu serijskih oznaka za koje želimo primiti žive podatke. Moguće je i izostaviti taj parametar pa ćemo primiti meteorološke podatke svih radiosonda koje su spojene sa SondeHubom. Izostavljanje *sondes* parametra se ne preporučuje zbog već prije spomenutog problema sa velikom količinom podataka koja pristiže. SondeHub na svoj server može primiti i po pola milijuna meteoroloških podataka u satu, pa će i naš server primiti toliko podataka ako izostavimo *sondes* parametar. Uz tolike količine podataka, vlastiti API server nema dovoljno resursa da izvrši na vrijeme neke GET upite, pa se preporučuje da se proizvoljnom logikom odredi nekoliko radiosonda koje su nam od interesa. Još jedna od limitacija je MQTT server za koji je odabran besplatan broker HiveMQ. Kada odjednom dođe jako puno živih podataka moguć je gubitak konekcije sa MQTT brokerom jer većina MQTT brokera ima limitaciju na broj poruka. Ako se izgubi konekcija nećemo više imati uživo podatke. Ovaj problem se također može riješiti sa limitiranjem prometa podataka. Ako ne želimo limitirati promet da riješimo manjak računalnih resursa, na API serveru možemo povećati broj računalnih resursa. Kako bi spriječili MQTT server da ne gubi konekciju moguće je napraviti vlastiti MQTT server koji će biti točno konfiguriran za naše potrebe.

## Zaključak

Postavljanje i konfiguriranje vlastitog poslužitelja za prikaz i agregaciju meteoroloških podataka pokazuje kako različite tehnologije i protokoli čine temelje za uspješan prijenos, analizu i agregaciju atmosferskih podataka. Svaka komponenta, od senzora radiosonda i njezinog balona do komunikacijskih protokola i hardverskih/softverskih rješenja, mora besprijekorno funkcionirati kako bi podaci bili korisni i pravovremeno dostupni. Implementacija i upravljanje ovakvim sustavima omogućava ne samo preciznije vremenske prognoze nego i doprinos znanstvenim istraživanjima koja ovise o kvalitetnim podacima iz atmosfere.

## Literatura

- [1] Edvard J. H., *Radiosondes – An Upper Air Probe*, (1996, lipanj). Poveznica: <https://www.aos.wisc.edu/~hopkins/wx-inst/wxi-raob.htm>; pristupljeno 18. kolovoza 2024.
- [2] odašiljač. *Tehnički leksikon (2007), mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2024. Poveznica: <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/odasiljac>; pristupljeno 20. kolovoza 2024.
- [3] B. Geerts and E. Linacre, *Bulletin of the American Meteorological Society* (1997, srpanj). Poveznica: <http://www.das.uwyo.edu/~geerts/cwx/notes/chap01/balloon.html>; pristupljeno 20. kolovoza 2024.
- [4] Stryker Radios, *VHF vs UHF Radios: The Differences Explained*, (2023, srpanj). Poveznica: <https://strykerradios.com/ham-radios/vhf-vs-uhf-radios-the-differences-explained/>; pristupljeno 21. kolovoza 2024.
- [5] Niubol, *Types of weather station*, (2023, studeni). Poveznica: <https://www.niubol.com/Product-knowledge/Types-of-weather-station.html>; pristupljeno 21. kolovoza 2024.
- [6] NWS, *Frequently Asked Question about Radiosonde Data Quality*, Poveznica: <https://www.weather.gov/upperair/FAQ-QC>; pristupljeno 21. kolovoza 2024.
- [7] NOAA, *Radiosondes*, (2024, ožujak). Poveznica: <https://www.noaa.gov/jetstream/upperair/radiosondes>; pristupljeno 21. kolovoza 2024.
- [8] NOAA, *Skew-T Parameters*, Poveznica: [https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU\\_Training\\_Page/convective\\_parameters/skewt/skewtinfo.html](https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/convective_parameters/skewt/skewtinfo.html); pristupljeno 21. kolovoza 2024.
- [9] Rich T., *Skew-T Diagram Basics*, (2021). Poveznica: [https://twister.caps.ou.edu/METR4403/lectures/lecture\\_02\\_SkewT\\_Parcel\\_Theory\\_2024\\_Lyons.pdf](https://twister.caps.ou.edu/METR4403/lectures/lecture_02_SkewT_Parcel_Theory_2024_Lyons.pdf); pristupljeno 21. kolovoza 2024.
- [10] Rami A. and Behnam D., *Software-defined Radios: Architecture, state-of-the-art, and challenges*, (2018). Poveznica: <https://www.cse.scu.edu/~bdezfouli/publication/SDR-COMCOM-2018.pdf>; pristupljeno 22. kolovoza 2024.
- [11] Analog Devices, *A Beginner's Guide to Digital Signal Processing (DSP)*, (2024). Poveznica: <https://www.analog.com/en/lp/001/beginners-guide-to-dsp.html>; pristupljeno 22. kolovoza 2024.
- [12] Lattice Semiconductor, *What is an FPGA*, (2024). Poveznica: <https://www.latticesemi.com/What-is-an-FPGA>; pristupljeno 22. kolovoza 2024.
- [13] Qasim C., *Top 5 Software Defined Radios (SDR) for RF Experimentation*, (2024). Poveznica: <https://wirelesspi.com/top-5-software-defined-radios-sdr-for-rf-experimentation/>; pristupljeno 22. kolovoza 2024.

- [14] USRadioguy, *What is RTL-SDR?*, (2024). Poveznica: <https://usradioguy.com/what-is-rtl-sdr/>; pristupljeno 22. kolovoza 2024.
- [15] Austin, *Getting Started With SDR: Tutorial*, (2021, rujna). Poveznica: <https://austinsnerdythings.com/2021/09/11/getting-started-with-sdr-software-defined-radio-a-tutorial/>; pristupljeno 22. kolovoza 2024.
- [16] COAA, *SondeMonitor*. Poveznica: <https://www.coaa.co.uk/sondemonitor.htm>; pristupljeno 22. kolovoza 2024.
- [17] Dilusha S., *Getting Started with SDRSharp*, (2023, srpanj). Poveznica: <https://rssl.lk/2023/07/13/getting-started-with-sdrsharp/>; pristupljeno 24. kolovoza
- [18] RTL-SDR, *RS42 Radiosonde Tracking Software*, (2018, srpanj). Poveznica: <https://www.rtl-sdr.com/rs41-radiosonde-tracking-software/>; pristupljeno 24. kolovoza 2024.
- [19] Juraj P., File Transfer Protocol, (2023, lipanj). Poveznica: [http://racfor.zesoi.fer.hr/doku.php?id=racfor\\_wiki:protokoli:file\\_transfer\\_protocol](http://racfor.zesoi.fer.hr/doku.php?id=racfor_wiki:protokoli:file_transfer_protocol); pristupljeno 25. kolovoza 2024.
- [20] Juraj P., File Transfer Protocol, (2023, lipanj). Poveznica: [http://racfor.zesoi.fer.hr/doku.php?id=racfor\\_wiki:mreznaforenzika:mqtt\\_protokol](http://racfor.zesoi.fer.hr/doku.php?id=racfor_wiki:mreznaforenzika:mqtt_protokol); pristupljeno 25. kolovoza 2024.
- [21] Simon S., *dxlAPRS SondeHub Uploader Extension*, (2023). Poveznica: <https://github.com/Eshco93/dxlAPRS-SHUE>; pristupljeno 27. kolovoza 2024.
- [22] modulacija. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024. Poveznica: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/modulacija>; pristupljeno 27. kolovoza 2024.
- [23] FMUser, *Frekvencijska modulacija*, (2023, ožujak). Poveznica: <http://hr.fmuser.net/content/?7873.html>; pristupljeno 29. kolovoza 2024.
- [24] Keir Nicoll, *Research Radiosondes*, (2012, veljača). Poveznica: <https://blogs.reading.ac.uk/wcd/2012/02/03/research-radiosondes/>; pristupljeno 29. kolovoza 2024.
- [25] NOAA, *Ozonesondes*, (2024). Poveznica: <https://gml.noaa.gov/ozwv/ozsondes>; pristupljeno 5. rujna 2024.
- [26] The Pennsylvania State University, *Short Primer on CAPE and CIN*, (2004). Poveznica: [https://www.education.psu.edu/files/meteo361/image/Section4/cape\\_primer0301.html](https://www.education.psu.edu/files/meteo361/image/Section4/cape_primer0301.html); pristupljeno 7. rujna 2024.
- [27] Vaisala, *Comparison of Vaisala Radiosondes RS41 and RS92*, (2014). Poveznica: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/RS-Comparison-White-Paper-B211317EN.pdf>; pristupljeno 8. rujna 2024.
- [28] Viavi, *What is Software Defined Radio (SDR)*, (2024). Poveznica: <https://www.viavisolutions.com/en-us/what-software-defined-radio-sdr>; pristupljeno 8. rujna 2024.
- [29] Jaimie B., *5 benefits of software defined radios (SDRs) over legacy RF systems*, (2024). Poveznica: <https://www.crf.com/blog/5-reasons-why-militaries-need-sdr-sensors-at-the-edge>; pristupljeno 9. rujna 2024.

- [30] KeySight, *What is Amplitude Modulation*, (2024). Poveznica: <https://www.keysight.com/used/hr/en/knowledge/glossary/oscilloscopes/what-is-amplitude-modulation>; pristupljeno 9. rujna 2024.
- [31] Geeksforgeeks, *BPSK – Binary Phase Shift Keying* (2024, ožujak). Poveznica: <https://www.geeksforgeeks.org/bsk-binary-phase-shift-keying/>; pristupljeno 6. rujna 2024.
- [32] Robert K., *Understanding Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) Modulation*, (2016, ožujak). Poveznica: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/quadrature-phase-shift-keying-qpsk-modulation/>; pristupljeno 6. rujna 2024.
- [33] ElectronicsCoach, *Phase Modulation (PM)*, (2024). Poveznica: <https://electronicscoach.com/phase-modulation.html>; pristupljeno 6. rujna 2024.
- [34] Zhou X., *What Is QAM?*, (2022, travanj). Poveznica: <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/QAM.html>; pristupljeno 6. rujna 2024.
- [35] J. Angelo Racoma, *Introduction to ARPS*, (2021, ožujak). Poveznica: <https://n2rac.com/introduction-to-aprs-ddd4097a0dba>; pristupljeno 7. Rujna 2024.

## Sažetak

### **Poslužitelj za pohranu i vizualizaciju podataka meteoroloških i amaterskih radiosondi**

U ovom radu obuhvaćeni su svi ključni aspekti meteoroloških radiosondi, od načina rada i primjene, do komunikacije s prizemnim prijemnicima. Detaljno se raspravlja o korištenju SDR tehnologije za prijem podataka s radiosondi, s naglaskom na arhitekturu i softverske alate za dekodiranje. Nadalje, istražene su vrste modulacija za prijenos meteoroloških podataka, internetski protokoli za prijenos podataka te njihove alternative. Završni dio rada bavi se pregledom postojećih poslužitelja i implementacijom vlastitog poslužitelja za prikaz podataka, uključujući modifikacije SondeHub platforme i postavljanje vlastitog API servera.

**Ključne riječi:** meteorološke radiosonde, SDR, prijenos podataka, poslužitelj, API server



# Summary

## **Server for storing and visualizing meteorological and amateur radiosonde data**

This paper covers all the key aspects of meteorological radiosondes, from the mode of operation and application to communication with ground receivers. The use of SDR technology to receive data from radiosondes is discussed in detail, with an emphasis on the architecture and software tools for decoding. Furthermore, types of modulations for the transmission of meteorological data, Internet protocols for data transmission and their alternatives were investigated. The final part of the work deals with the review of existing servers and the implementation of your own data display server, including modifications of the SondeHub platform and setting up the API server.

**Keywords:** meteorological radiosondes, SDR, data transmission, server, API server