

Programiranje prijamnika ADS-B definiranog softverom

Dobroslavić, Tea

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:079856>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Tea Dobroslavić

PROGRAMIRANJE PRIJAMNIKA ADS-B DEFINIRANOG SOFTVEROM

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 5. travnja 2018.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovna navigacija**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 4817

Pristupnik: **Tea Dobrosravić (0135237375)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Kontrola leta**

Zadatak: **Programiranje prijamnika ADS-B definiranog softverom**

Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati sustav ADS-B i objasniti strukturu signala istoga. Potrebno je navesti tehničke karakteristike softverom definiranog prijamnika te opisati princip rada istoga. Student će pripremiti razvojno okruženje za programiranje softverom definiranog prijamnika, a potom i izvršiti programiranje prijamnika ADS-B. Navedene postupke, kao i načela obrade signala, student će opisati u radu. Po izvršenom programiranju prijamnika, student će isti koristiti za prijam signala ADS-B-a te prikaz informacija o lokalnim letovima.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



doc. dr. sc. Tomislav Radišić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

ZAVRŠNI RAD

Programiranje prijamnika ADS-B definiranog softverom

Development of a Software-defined ADS-B Radio Receiver

Mentor: doc. dr. sc. Tomislav Radišić

Student: Tea Dobroslavić
JMBAG: 0135237375

Zagreb, 2018.

SAŽETAK

Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) je sljedeća generacija nadzorne tehnologije u zrakoplovstvu. Svrha mu je odrediti poziciju zrakoplova i automatski odaslati tu informaciju, zajedno s informacijama o visini, brzini i pravcu leta, zemaljskim stanicama i okolnim zrakoplovima. Objasnjeno je princip rada sustava, kao i struktura signala koji odašilje sustav. Objasnjene su tehničke karakteristike softverom definiranog prijamnika, te je takav prijamnik korišten u praktičnom dijelu rada za prijam ADS-B signala.

KLJUČNE RIJEČI: ADS-B; Nadzor; Poruke; SDR; Programiranje; LimeSDR; RTL-SDR

SUMMARY

Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) is the next generation of the surveillance technology in aviation. Its main purpose is to determine the position of the aircraft and then to broadcast it automatically, alongside with altitude, speed and heading, to ground facilities and other aircrafts in the vicinity. Technical characteristics of the system are explained, and so is the structure of the transmitted signals. Technical characteristics of a software defined radio are explained, and such a receiver was used in the experimental part of the thesis for receiving ADS-B signals.

KEYWORDS: ADS-B; Surveillance; Messages; SDR; Programming; LimeSDR; RTL-SDR

Sadržaj

1. UVOD	1
2. PREGLED NADZORNIH TEHNOLOGIJA U ZRAKOPLOVSTVU	2
2.1. Primarni nadzorni radar	3
2.2. Sekundarni nadzorni radar	3
2.3. Multilateracijski sustav nadzora zračnog prometa	4
3. ADS-B	5
3.1. Frekvencije komunikacije sustava	5
3.1.1. UAT	6
3.1.2. Mod S.....	6
3.2. Poruke sustava.....	6
3.2.1. Tipovi poruka	7
3.2.2. Identifikacija zrakoplova.....	8
3.2.3. Položaj zrakoplova u zraku	9
3.2.4. Brzina zrakoplova	13
4. SDR.....	18
4.1. Obrada signala na tradicionalnom radio prijemniku.....	18
4.2. Obrada signala na <i>SDR</i> prijemniku	19
4.3. Primjena <i>SDR</i> -a	20
5. PROGRAMIRANJE SOFTVEROM DEFINIRANOG ADS-B PRIJAMNIKA.....	21
5.1. LimeSDR.....	21
5.1.1. Postupak programiranja	22
5.1.2. Primjena.....	26
5.1.3. Dekodiranje <i>ADS-B</i> poruka	27
5.2. RTL-SDR.....	30
5.2.1. Postupak programiranja	31
5.2.2. Prikaz dekodiranih podataka	35
6. ZAKLJUČAK.....	38
LITERATURA	39
POPIS SLIKA.....	41
POPIS TABLICA	42

1. UVOD

Nadzorne tehnologije koje su trenutno u uporabi u zrakoplovstvu dolaze do svog maksimalnog kapaciteta zbog nedostataka u širenju vidljivosti, ograničenja vidljivosti, ograničenja glasovnih komunikacija i nedostatka digitalnih podatkovnih veza. Jedno od rješenja je implementacija i korištenje nove nadzorne tehnologije: *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B)* u još većoj mjeri. To je nadzorna tehnologija koja se sastoji od više komponenti koje istodobno rade na prikupljanju informacija i šire ih putem emitiranja signala. Tu su glavni izvor informacija satelitski navigacijski sustavi, koji pružaju podatke o lokaciji zrakoplova. Ti podaci se zatim pridružuju s podacima sa zrakoplovnih navigacijskih sustava. Taj zbir podataka se onda odašilje zemaljskim stanicama, kao i zrakoplovima u blizini.

ADS-B zemaljska infrastruktura sastoji se od bilo kojeg broja *ADS-B* prijamnika koji su umreženi kako bi pružali informacije sustavu kontrole zračne plovidbe. Topografija mreže zemaljskih stanica određuje karakteristike pokrivanja nižih nadmorskih visina i vjerojatnost zaprimanja *ADS-B* signala. Prijamnici nadziru točnost i cjelovitost izvedenih informacija o položaju zrakoplova.

Pretežni standard odašiljanja *ADS-B* poruka je *1090 Extended Squitter*. Taj naziv potječe od frekvencije rada na 1090 MHz, na kojoj rade i sekundarni nadzorni radar, kao i multilateracijski sustav nadzora. "*Squitter*" je izraz za autonomni transmisijski prijenos, za razliku od "*Squawk*" poruke sekundarnog radara koja je odgovor na dolazni upit.

Globalno, *ADS-B* je u fazi implementacije od početka 2000. godine. Pokazao se kao dobro rješenje u područjima gdje prethodno nikakav oblik nadzora nije bilo moguće fizički ili ekonomski izvesti, poput zaljeva Hudson u Kanadi, Australske unutrašnjosti ili oceanskih područja, navodi *SESAR (Single European Sky ATM Research)* u svom izvještaju o statusu implementacije *ADS-B* i drugih načina nadzora, objavljenom 15. svibnja 2018.

2. PREGLED NADZORNIH TEHNOLOGIJA U ZRAKOPLOVSTVU

Nadzor zrakoplova ima ključnu ulogu za kontrolu zračne plovidbe. Mogućnost da se točno i precizno odrede pozicije zrakoplova u prostoru ima direktan utjecaj na separacijske udaljenosti potrebne između zrakoplova, a samim time i na sigurnost i efikasno iskorištavanje zračnog prostora. Postoje različite nadzorne tehnologije u zrakoplovstvu pogodne za korištenje od strane kontrole letenja: primarni i sekundarni nadzorni radar, multilateracijski sustav nadzora zračnog prometa, *ADS-B*, te *ADS-C*. Razvoj ovih tehnologija omogućuje viši stupanj sigurnosti, preciznosti, te efikasnosti. Iako je nadzorna tehnologija značajno uznapredovala proteklih godina, ne može se reći da je jedna vrsta nadzora u svim aspektima bolja od ostalih, jer npr. nadzorna tehnologija koja omogućuje najbolje praćenje zrakoplova u kompleksnim prilazima može biti manje učinkovita u planinskim područjima. Postizanje optimalnih rezultata moglo bi se dobiti kombiniranjem različitih nadzornih tehnologija [1].

U Hrvatskoj, detekciju zrakoplova u prostoru omogućuju suvremeni radarski sustavi, koji prate zahtjeve europske regulative. Sekundarni nadzorni radar (*Secondary Surveillance radar - SSR*), uz transponder u zrakoplovu, omogućuje jednoznačno identificiranje zrakoplova. To se naziva kooperativna neovisna detekcija (*Co-operative independent surveillance*) [2]. Kooperativna detekcija znači da sekundarni radar ovisi o opremi u zrakoplovu, tj. o transponderu, kako bi odredio njegovu poziciju u prostoru uz ostale informacije. Točnije 2D pozicija zrakoplova se određuje pomoću radara na zemlji, a visina, identifikacija zrakoplova, te ostale informacije se dobivaju od zrakoplova preko transpondera. Neovisna detekcija znači da se pozicija zrakoplova mjeri od zemlje, kako je već spomenuto. Pod kooperativnu neovisnu detekciju spada i multilateracijski sustav nadzora zračnog prometa (*Multilateration - MLAT*) [1]. *MLAT* se zasad ne koristi u Hrvatskoj, ali se planira implementirati na Zračnoj luci Franjo Tuđman, u Zagrebu, kao dio sustava za nadzor prometa i vođenja zrakoplova na manevarskim površinama (*Advanced - Surface Movement Guidance & Control System - A-SMGCS*), u svrhu modernizacije sustava upravljanja zračnim prometom [3].

Primarni nadzorni radar (*Primary Surveillance Radar-PSR*), koji je preteča sekundarnom nadzornom radaru, spada pod nekooperativnu i neovisnu detekciju (*Non-Cooperative Independent Surveillance*) zrakoplova, te se koristi za osiguranje detekcije ako se iz nekog razloga detekcija ne može ostvariti pomoću *SSR-a*, npr. zbog kvara ili namjernog neodgovaranja na upite zemaljskog sustava. Nekooperativna detekcija znači da sustav ne ovisi o zrakoplovnoj opremi pri svom radu.

Hrvatska kontrola zračne plovidbe (*HKZP*) u svom sustavu ima 3 *SSR* sustava, na lokacijama: Pleso, Kozjak i Psunj, čiji se podatci integriraju s podacima vojnih radara, koji su na lokacijama: Sljeme, Učka i Rota. Disperziranost na različitim geografskim lokacijama i redundantnost sustava omogućuje višestruko pokrivanje područja odgovornosti rutnih i terminalnih područja RH, te omogućuje dodatnu sigurnost.

ADS-B spada pod kooperativnu i ovisnu detekciju, što znači da se pozicija zrakoplova određuje na samom zrakoplovu, koristeći opremu zrakoplova. Ova tehnologija nadzora će biti detaljno objašnjena kasnije u radu. Tu također spada *ADS-C*, koji je nazivom sličan *ADS-B*, ali spada pod različitu aplikaciju [2].

2.1. Primarni nadzorni radar

Primarni nadzorni radar je sustav koji antenom odašilje elektromagnetske valove (*EM*) u okolni prostor, te prima nazad *EM* reflektirane od ciljeva unutar tog prostora, tj. unutar svog dometa. Kao što je već prije rečeno, ne ovisi o opremi u zrakoplovu za detekciju cilja, već samo o refleksivnosti *EM* valova. Osnovni princip rada takvog radara je računanje udaljenosti od lokacije *PSR-a* do cilja, poznavajući brzinu rasprostiranja *EM* vala i mjereći vrijeme potrebno *EM* signalu da otputuje do cilja i natrag. Osim udaljenosti od zemaljske stanice, informacije dobivene *PSR-om* uključuju azimut u odnosu na poziciju zemaljske stanice, te radijalnu brzinu dobivenu koristeći Dopplerov efekt.

PSR spada u ultra visoko frekventno (*Ultra high frequency- UHF*) područje rada i više frekvencijske pojaseve, što za prednost ima rasprostiranje signala bez ionosferskih smetnji, uže i efikasnije zrake širenja signala, za preciznije određivanja azimuta, zbog kraće valne duljine. Također, kraće valne duljine omogućuju kraće impulse i bolje se reflektiraju.

Svaki impuls mora doputovati do najdaljeg planiranog cilja prije nego se pošalje idući impuls, inače se ne mogu upariti impuls i njegov odjek tj. refleksija. Maksimalni teoretski domet se određuje preko frekvencije ponavljanja impulsa (*Pulse repetition frequency-PRF*). *PRF* je broj poslanih impulsa unutar jedne sekunde. Što je niži *PRF*, to je veći teoretski domet.

Još jedna važna karakteristika *PSR-a* je rezolucija. Rezolucija je sposobnost radara da odvojeno detektira dva različita cilja. Razlikujemo rezoluciju doleta (*Range resolution*), koja predstavlja stupanj preciznosti do kojeg *PSR* može odvojeno detektirati dva cilja unutar vidnog polja koji nisu na istoj visini u odnosu na radar, i rezoluciju azimuta (*Bearing resolution*), koja predstavlja stupanj preciznosti do kojeg *PSR* može odrediti azimut cilja [4].

2.2. Sekundarni nadzorni radar

Sekundarni nadzorni radar je radar s aktivnim odjekom, što znači da se za razliku od *PSR-a* ne oslanja na refleksiju *EM* valova od zrakoplov da bi ga detektirao. Stanica na zemlji šalje kodirane upite putem interogatora (zemaljskog pitača) koje prima i na koje odgovara transponder (odgovarač na zrakoplovu). To znači da se i sustav na zemlji i sustav na zrakoplovu sastoje od odašiljača i prijamnika. Interogator šalje upite na frekvenciji od 1030 MHz, a transponder odgovara na frekvenciji od 1090 MHz.

Transponder šalje kodirane odgovore na upit sustava na zemlji, čiji sadržaj ovisi o modu rada transpondera. Svaki mod prvenstveno pokazuje poziciju zrakoplova u prostoru, a ostale informacije su se s vremenom nadograđivale. Mod A pruža identifikaciju zrakoplova, a mod C uz to pruža i informaciju o visini zrakoplova, koju dobija pomoću na kodirajućeg visinomjera.

Mod S ima preko 17 milijuna jedinstvenih 24-bitnih kodova, koji se koriste za dodjelu zrakoplovnih adresa. Osim informacija koje pružaju mod A i mod C, mod S pruža gotovo sve informacije iz plana leta. Mod S radi na principu jedinstvenog upita namijenjenog za specifičan zrakoplov, čija jedinstvena adresa mora biti poznata. Zrakoplov, tj. transponder na zrakoplovu šalje jedinstven odgovor, a udaljenost od stanice na zemlji se određuje vremenom potrebnim za zaprimanje upita. Omogućuje selektivno slanje upita i odgovora. Mod S je kompatibilan za rad s modovima A i C. Transponder moda S, s mogućnošću rada s *ADS-B* sustavom, može primiti podatke o poziciji zrakoplova putem navigacijskih satelita i odašiljati iste putem *ADS-B* poruke. Nemaju svi transponderi moda S sposobnost rada s *ADS-B* sustavom, ali mod S transponderi, naspram ostalih modova rada, su kompatibilniji s multilateracijskim sustavom [5].

2.3. Multilateracijski sustav nadzora zračnog prometa

Multilateracija je nadzorni sustav koji koristi signale odaslane sa zrakoplova kako bi izračunao njegovu točnu poziciju. *Mlat* mjeri razliku u vremenu dolaska signala (*Time difference of arrival - TDOA*) od zrakoplova do najmanje tri stanice na zemlji koje su međusobno sinkronizirane. Signal odaslan sa zrakoplova će na svaku stanicu tj. prijemnik doći u nešto različitom vremenu zbog različite udaljenosti od zrakoplova do stanica na zemlji. Minimalni zahtjev za rad *Mlat* sustava je transponder koji podržava rad moda A ili C, a mod S poboljšava djelotvornost sustava. Te *Mlat* stanice "slušaju" signale koje zrakoplovi šalju, uglavnom signale poslane s transpondera zrakoplova kao odgovor na interogator *SSR-a* i te odgovore koriste za određivanje pozicije.

Razlikujemo aktivnu i pasivnu multilateraciju. Aktivna multilateracija šalje upite na frekvenciji 1030 MHz, a prima odgovore na frekvenciji od 1090 MHz. Dok pasivna multilateracija samo prima odgovore na frekvenciji od 1090 MHz. Te frekvencije su izabrane za područje rada kako bi se minimalizirali troškovi implementacije, već sustav radi u istom području rada kao i *SSR*, pa nije potrebna izmjena sustava i uređaja na zrakoplovu. Također, nisu potrebni kompleksni sustavi na zemlji koje je potrebno održavati, već samo računala s dovoljno snažnim procesorom koji će triangulacijom odrediti poziciju zrakoplova i prenijeti ostale informacije dobivene od transpondera [6].

3. ADS-B

Automatic Dependent Surveillance (ADS) je nadzorna tehnologija čiji se rad temelji na automatskom slanju podataka sa zrakoplova, putem podatkovne veze, koji su dobiveni s navigacijskih uređaja na samom zrakoplovu i sustava za određivanje pozicije, uključujući identifikaciju zrakoplova, poziciju zrakoplova unutar četiri dimenzije i ostale informacije koje su potrebne. Razlikujemo dvije vrste *ADS-a*: *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B)* i *Automatic Dependent Surveillance – Contract (ADS-C)*. Temeljna razlika između te dvije vrste *ADS-a* je u načinu odašiljanja podataka tj. razlogu odašiljanja. *ADS-B* automatski odašilje podatke, bez zahtjeva od zemaljske stanice ili drugog zrakoplova. *ADS-C* odašilje podatke na zahtjev zemaljske stanice i sadržaj tih informacija određuje također zemaljska stanica. Komunikacija između zemaljske stanice i zrakoplova se provodi putem navigacijskih satelita i koristi se za nadzor zrakoplova tijekom prekoceanskih letova gdje zamjenjuje *HF (High frequency)* komunikaciju [7].

International Civil Aviation Organization (ICAO) definira *ADS-B* kao sredstvo kojim zrakoplovi, aerodromi i ostali objekti mogu automatski odašiljati i primati podatke kao što su identifikacija, pozicija i dodatne informacije o zrakoplovu putem podatkovne veze. To podrazumijeva da zrakoplov odašilje svoju poziciju: geografsku dužinu i širinu, visinu, brzinu, identifikaciju, te ostale informacije dobivene od sustava na zrakoplovu. Sve *ADS-B* poruke sadrže indikaciju kvalitete podataka kako bi korisnici mogli odrediti jesu li podatci dovoljno pouzdani da bi podržavali namijenjenu funkciju. Indikacija kvalitete podataka o poziciji, brzini i ostalim informacijama o zrakoplovu se uglavnom dobiva od globalnog navigacijskog satelitskog sustava (*Global Navigation Satellite System - GNSS*) na zrakoplovu. Postojeći inercijalni senzori ne pružaju dovoljno točne ili pouzdane podatke, iako bi razvoj tih sustava u budućnosti mogao riješiti taj problem.

ADS-B se sastoji od dvije različite usluge: „*ADS-B in*“ i „*ADS-B out*“. „*ADS-B in*“ je funkcija koja tijekom leta prima podatke odaslane funkcijom „*ADS-B out*“ instaliranom na drugim zrakoplovima. Može također primati dodatne podatke od zemaljskih stanica, koje su odaslali zrakoplovi koji ne podržavaju „*ADS-B out*“ funkciju ili čija funkcija odašilje podatke koristeći drukčiju *ADS-B* tehnologiju. „*ADS-B out*“ je funkcija zrakoplova ili vozila koja periodično odašilje podatke o poziciji i brzini, te ostale informacije dobivene od zrakoplovnih sustava, u obliku koji je prikladan za „*ADS-B in*“ prijamnike [8].

3.1. Frekvencije komunikacije sustava

ADS-B sustav komunicira s drugim zrakoplovima i zemaljskim stanicama u *VHF* području rada. Ipak postoji razlika u komunikaciji sustava s obzirom na geografsku lokaciju. U Sjedinjenim Američkim Državama (*SAD*) koristi se *UAT (Universal Access Transceiver)* na frekvenciji od 978 MHz, a u Europi se komunikacija odvija putem moda *S* transpondera na frekvenciji od 1090 MHz.

3.1.1. UAT

UAT i slični primopredajnici su temelj ADS-B sustava u SAD-u. Oni odašilju poziciju zrakoplova i podatke o performansama, a istodobno primaju podatke o okolnom prometu, vremenu i ostalim informacijama od zemaljskih stanica. Komunicira sa sustavima usluge informiranja u letu (*Flight Information Service – Broadcast FIS-B*) i sustavima usluge prometnog informiranja (*Traffic Information Service – Broadcast - TIS-B*), te podržava ADS-B sustav.

FIS-B pruža informacije o vremenu: poruke i grafičke prikaze, NOTAM (*Notice to Airmen*), ATIS (*Automatic Terminal Information Service*) i slične informacije. FIS-B se razlikuje od ADS-B po tome što FIS-B zahtijeva vanjske izvore podataka i ima drukčije zahtjeve za period odašiljanja poruka.

TIS-B je usluga pružanja zrakoplovnih informacija o okolnom prometu zrakoplova u stvarnom vremenu. Koristi se kao savjetodavna usluga o prometu (traffic advisory) ili za identificiranje "neposrednog uljeza" u svrhu izbjegavanja sudara. Prikazuje sliku na zaslonu sličnu onoj koju vide kontrolori leta na tlu. Kombinira informacije dobivene od GPS-a (*Global Positioning System*) i SSR sustava na zemlji. Sustav odašilje na frekvenciji UAT-a, ali također i na frekvenciji od 1090 MHz.

UAT sustav je prvi takav sustav certificiran u SAD-u za nadzor zračnog prometa pri pružanju usluga kontrole zračne plovidbe. Od 2001. godine, na Aljasci, se koristi za pružanje *en-route* separacije od 5 NM. UAT korisnici primaju informacije od zemaljskih stanica putem FIS-B, izvještaje o okolnom prometu putem TIS-B, a mogu i izravno promatrati okolne zrakoplove s visokim stupnjem točnosti. Iz tog razloga se UAT sustav naziva dvosmjernim sustavom, jer omogućuje komunikaciju zrak-zrak i zemlja-zrak [7].

3.1.2. Mod S

U Europi se komunikacija ADS-B sustava sa zemaljskim stanicama vrši na frekvenciji transpondera moda S, 1090 MHz ES. ES (*extended squitter*) je mod rada odašiljanja poruka transpondera s 56 bitova dodatnih podataka u odnosu na konvencionalnu Mode S poruku, što cijelu poruku čini dugom 112 bita.

Ti dodatni podatci sadržavaju informacije o visini, poziciji, predviđenom vremenu dolaska na točku i planiranoj ruti leta. Ovaj način rada sustava podržava TIS-B sustav, ali ne i FIS-B sustav. Takav način rada je također kompatibilan sa sustavom TCAS (*Traffic Collision Avoidance System*), što može biti i prednost i mana, jer u područjima velike gustoće prometa to može dovesti do zagušenja frekvencije zbog velikog broja sustava koji rade na toj frekvenciji [7].

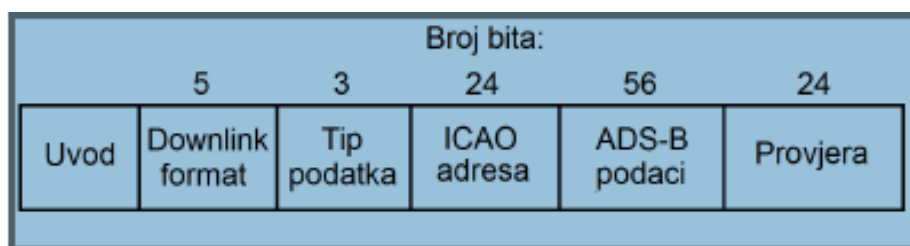
3.2. Poruke sustava

Poruka ADS-B sustava je dugačka 112 bitova, te se sastoji od pet dijelova. Frekvencija odašiljanja je 1Hz, tj. poruka se šalje svake sekunde prema zemaljskoj stanici. Informacije u poruci su modulirane koristeći *Pulse Position Modulation (PPM)*.

Svaka *ADS-B* poruka započinje uvodom trajanja 8 μ s koji omogućuje prijamniku da identificira nadolazeću poruku i da se sinkronizira s odašiljačem na zrakoplovu, te ga ne ubrajamo u sastavnih pet dijelova poruke. Nakon uvoda slijedi prvi dio poruke, a to je Downlink format (DF) 17, ili 18 ako se radi o *TIS-B* poruci. To odgovara binarnom kodu 10001, odnosno 10010, za prvih pet bitova.

Kada se koristi DF=18, umjesto DF=17, podsustav koji zaprima tu poruku prepoznaje da je poruka poslana od sustava kojemu se ne može natrag slati upit (tj. ne komunicira s transponderom). Dakle, DF se koristi za identifikaciju tipa poruke i dugačak je 5 bitova. Sljedeći dio poruke je tip podatka (*capability* – CA) i dugačak je 3 bita. CA opisuje specifičan podatak koji se šalje porukom. Iduće slijedi ICAO adresa tj. identifikacija zrakoplova, dužine 24 bita. Nakon identifikacije slijede *ADS-B* podatci, dužine 56 bita, koji sadrže informacije o visini leta i poziciji zrakoplova (geografska širina i dužina pozicije zrakoplova). Posljednji dio poruke je provjera, dužine 24 bita. Taj dio je rezerviran kao kod za otkrivanje grešaka, koji može pomoći prijamniku da otkrije pogrešku u poruci [9].

Svi dijelovi poruke *ADS-B* sustava prikazani su na *slici 1*, te su kratice i funkcije nabrojane u *tablici 1*.



Slika 1: Dijelovi *ADS-B* poruke, [10]

Tablica 1: Kratice i funkcije dijelova *ADS-B* poruke

Početni bit	Završni bit	Kratice	Ime funkcije
1	5	DF	Downlink format
6	8	CA	Tip podatka (Capability)
9	32	ICAO24	ICAO identifikacija zrakoplova
33	88	DATA	ADS-B podatci (Data frame/block)
89	112	PC ili PI	Provjera (Parity information/check)

[11]

3.2.1. Tipovi poruka

Nakon prepoznavanja uvoda potrebno je identificirati pojedinačne bitove za dekodiranje poruke. Bitovi se detektiraju pomoću postavke praga amplitude signala uvoda. To zahtijeva da signal ostane na relativno konstantnoj amplitudi tijekom transmisije. Signal čiji impulsi idu preko praga amplitude rezultiraju greškom u dekodiranju i bit će odbačeni. Nakon što su bitovi

uspješno primljeni bit će dekodirani na temelju vrste poruke tj. *type code-a* na početku DF17. DF17 dio poruke ima određen raspored individualnih dijelova i taj format je poznat kako bi se omogućilo pravilno dekodiranje visine, identifikacije zrakoplova i dr. U *tablici 2* su nabrojane vrijednosti *type code-a* i značenja. Treba naglasiti da se *type code* nalazi unutar podatkovnog bloka poruke [11].

Tablica 2: Vrijednosti *type code-a* i značenja

Downlink format	Type code	Sadržaj podatkovnog bloka
17	1 do 4	Identifikacija zrakoplova
17	5 do 8	Pozicija s obzirom na tlo
17	9 do 18	Pozicija u zraku(visina po tlaku)
17	19	Zračna brzina
17	20 do 22	Pozicija u zraku (prema GNSS)
17	23	Test poruka
17	24	Statu sustava na tlu
17	25 do 27	Rezervirano
17	28	Status ES (Extended squitter)
17	29	Status stanja
17	30	Rezervirano
17	31	Operativni status zrakoplova

[11]

3.2.2. Identifikacija zrakoplova

Sustav prepoznaj da podatkovni blok sadrži podatak o identifikaciji zrakoplova ako poruka sadrži DF17 i *type code* u vrijednosti od 1-4. Kao što je već naglašeno *type code* se nalazi na početku podatkovnog bloka i sadrži 5 bitova. Dekodiranje identifikacije zrakoplova bit će prikazano u sljedećim primjerima u *tablicama 3 i 4* [11].

Poruka u izvornom obliku je glasila: "8D4064422015A672CCA320BB799F", a dio poruke koji je podatkovni blok je "2015A672CCA320" čiji je početak "20" zapravo *type code* koji konvertiran u binarni sustav ima vrijednost 00100 000, što konvertirano u decimalni sustav daje vrijednost 4, po čemu sustav prepoznaje da blok sadrži podatak o identifikaciji zrakoplova. Sustav dalje dekodira ostatak podatkovnog bloka, konvertirajući "15A672CCA320" prvo u binarnu vrijednost, pa zatim u decimalnu i na kraju uparuje decimalnu vrijednost s brojem ili slovom. Dekodirana identifikacija zrakoplova, tj. pozivni znak je EYZ23JL. EYZ je pozivni znak za zračnu kompaniju easyJet [12].

Tablica 3: Primjer poruke u heksadecimalnom numeričkom sustavu

DF+CA	ICAO identifikacija zrakoplova	Podatkovni blok	Provjera
8D	406442	2015A672CCA320	BB799F

[12]

Tablica 4: Postupak dekodiranja podatkovnog bloka

Heksadecimalni sustav	2015A672CCA320									
Binarni sustav	00100	000	000101	011010	011001	110010	110011	001010	001100	100000
Decimalni sustav	-	-	5	26	25	50	51	10	12	32
Slovo ili broj	-	-	E	Z	Y	2	3	J	L	-

[12]

3.2.3. Položaj zrakoplova u zraku

Poruka koja sadrži podatke o položaju zrakoplova u zraku sadrži i DF17, te *type code* od 9 do 18. Položaj zrakoplova u zraku podrazumijeva geografsku širinu i dužinu, te visinu zrakoplova.

Naizmjenično se emitiraju dvije vrste poruka o položaju: paran i neparan okvir. S obzirom na te poruke postoje dva načina dekodiranja položaja zrakoplova:

- Nepoznat položaj, koristeći obje vrste poruka (globalno nedvosmislena poruka)
- Znajući prethodni položaj, koristeći samo jednu poruku (lokalno nedvosmislena poruka).

Sadržaj poruke o položaju zrakoplova se kodira u Compact position reporting (*CPR*) obliku. Glavna ideja iza *CPR* je da se što veći broj decimala koordinata kodira u što manji broj bitova. Navesti ćemo neke od parametara i funkcija koji se koriste pri takvom kodiranju.

Pri *CPR* kodiranju Zemlja je podijeljena u određeni broj zona. Broj zona zemljopisnih širina (*Number of latitude zones - NZ*) je broj zona koje se prostiru između polova i ekvatora i on je jednak 15. Za transponder moda S $NZ = 15$. Funkcija "*floor* (*x*)", naziva funkcija najvećeg broja, daje najveći cijeli broj koji nije veći od *x*. Npr. za funkciju *floor* (4.5) rješenje je 4. Nadalje, funkcija mod (*x*,*y*) ima vrijednost $x - y \cdot \text{floor}\left(\frac{x}{y}\right)$, pri čemu *y* ne smije biti 0.

Broj zona zemljopisnih dužina (*Number of longitude zones - NL*) ovisi o stupnju zemljopisne širine i uvijek iznosi između 1 i 59. Računa se prema formuli (1), pri čemu je *NL* broj zemljopisnih dužina, a *NZ* broj zemljopisnih širina [11].

$$NL(lat) = \text{floor} \left(\frac{2\pi}{\arccos\left(1 - \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot NZ}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi}{180} \cdot lat\right)}\right)} \right) \quad (1)$$

Za geografske širine koje su blizu ekvatora ili polova dobivene vrijednosti su prikazane u *tablici 5*.

Tablica 5: Broj zona zemljopisnih dužina (NL)

Zemljopisne širine (lat)	NL
0	59
lat = +87	2
lat = -87	2
lat > +87	1
lat < -87	1

[11]

Kako je već spomenuto poruke se emitiraju u parnom i neparnom okviru (*frame* - *F*). Za svaki *F* bit 54 određuje da li je paran ili neparan. *F* je paran ako je vrijednost bita 54 jednaka 0, a neparan ako je jednaka 1. Geografska širina i dužina kodirane CPR metodom iznose 17 bitova, a 131072 (2^{17}) je maksimalna vrijednost. *Tablica 6* prikazuje računanje geografske širine i dužine CPR metodom [11].

Tablica 6: Računanje geografske širine i dužine CPR metodom

Tip	F	Geografska širina	Geografska dužina
Paran	0	10110101101001000	01100100010101100
Neparan	1	10010000110101110	01100010000010010

[11]

Dobivene decimalne vrijednosti geografske širine i dužine se pretvaraju u decimalni oblik, te se ta decimalna vrijednost dijeli s maksimalnom vrijednosti 131072 kako bi se dobio krajnji rezultat izražen u postotku. Postupak je prikazan u *tablici 7*.

Tablica 7: Pretvorba binarnog oblika u decimalni

Binarna vrijednost	Decimalna vrijednost	Podjela	Rezultat (%)
10110101101001000	93000	93000 / 131072	0,7095
01100100010101100	51372	51372 / 131072	0,3919
10010000110101110	74158	74158 / 131072	0,5658
01100010000010010	50194	50194 / 131072	0,3829

[11]

Vrijednosti iz *tablice 7*, u *tablici 8* razvrstane su kao parne i neparne.

Tablica 8: Vrijednosti razvrstane kao parne i neparne poruke

Parne poruke (even)		Neparne poruke (odd)	
Geografska širina	LAT_CPR_EVEN = 0,7095	Geografska širina	LAT_CPR_ODD = 0,5658
Geografska dužina	LON_CPR_EVEN = 0,3919	Geografska dužina	LON_CPR_ODD = 0,3829

[11]

Sljedeći korak je računanje indeksa zemljopisne širine – j . On se računa prema sljedećoj formuli: $j = \text{floor}(59 \times \text{lat}_{cprEven} - 60 \times \text{lat}_{cprOdd} + 0,5)$ (2), pri čemu je $\text{lat}_{cprEven}$ vrijednost zemljopisne širine za parnu poruku, a lat_{cprOdd} je vrijednost zemljopisne širine za neparnu poruku.

Formule 3 i 4 ustanovljuju dvije konstante, koje će biti potrebne u idućem koraku.

$$dlat_{even} = \frac{360}{4 \cdot NZ} = \frac{360}{60} \quad (3)$$

$$dlat_{odd} = \frac{360}{4 \cdot NZ - 1} = \frac{360}{59} \quad (4)$$

Ove konstante se koriste u trećem koraku računanja zemljopisne širine, opisanom formulom 5 ili 6, ovisno radi li se o parnoj ili neparnoj poruci.

$$\text{lat}_{even} = dlat_{even} \cdot [\text{mod}(j, 60) + \text{lat}_{cprEven}] \quad (5)$$

$$\text{lat}_{odd} = dlat_{odd} \cdot [\text{mod}(j, 59) + \text{lat}_{cprOdd}] \quad (6)$$

Za južnu hemisferu vrijednosti iznose između 270° i 360° , a vrijednosti moraju biti unutar vrijednosti $[-90^\circ, +90^\circ]$, stoga se mora vršiti korekcija pomoću idućih formula:

$$\text{lat}_{even} = \text{lat}_{even} - 360 \quad (7), \text{ ako je vrijednost } \text{lat}_{even} \text{ veća ili jednaka } 270.$$

$$\text{lat}_{odd} = \text{lat}_{odd} - 360 \quad (8), \text{ ako je vrijednost } \text{lat}_{odd} \text{ veća ili jednaka } 270.$$

Konačna geografska širina se odabire prema vremenskom okviru dolaska poruke. Uzima se najnovija poruka, a kriterij odabira je prikazan u formuli 9, pri čemu je T_{even} vrijeme dolaska parne poruke, a T_{odd} vrijeme dolaska neparne poruke.

$$\text{lat} = \begin{cases} \text{lat}_{even} & \text{if } (T_{even} \geq T_{odd}) \\ \text{lat}_{odd} & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

Slika 2 prikazuje odabir parne poruke, koja je odabrana po vremenu dolaska tj. stigla je posljednja.

```
Lat_EVEN = 52.25720214843750
Lat_ODD  = 52.26578017412606
Lat = Lat_EVEN = 52.25720
```

Slika 2: Odabir parne poruke za geografsku širinu, [11]

Prije izračuna geografske dužine, provjerava se točnost podataka u poruci. Ukoliko su parni i neparni broj zona geografskih dužina jednaki može se nastaviti daljnji proračun, a ako te vrijednosti nisu jednake, položaj se nalazi u dvije različite zone i daljnji proračun nije moguć, već se treba čekati nova poruka.

Računanje zemljopise dužine započinje provjerom vremenskog okvira poruke. Prvi slučaj je dolazak parne poruke posljednje ($T_EVEN > T_ODD$). Formule potrebne za izračun zemljopisne dužine:

$$ni = \max(NL(Lat_{Even}), 1) \quad (10)$$

$$DLon = \frac{360}{ni} \quad (11)$$

$$m = \text{floor}(Lat_{cprEven} \times [NL(Lat_{Even}) - 1] - Lat_{cprOdd} \times NL(Lat_{cprEven}) + 0,5) \quad (12)$$

$$Lon = DLon \times (\text{mod}(m, ni) + Lat_{cprEven}) \quad (13)$$

Drugi slučaj je dolazak neparne poruke posljednje ($T_EVEN < T_ODD$), a formule potrebne za taj izračun su slijedeće:

$$ni = \max(NL(Lat_{Odd}) - 1, 1) \quad (14)$$

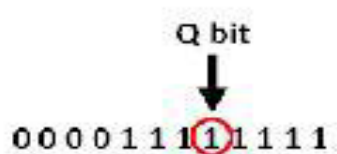
$$DLon = \frac{360}{ni} \quad (15)$$

$$m = \text{floor}(Lat_{cprEven} \times [NL(Lat_{Odd}) - 1] - Lat_{cprOdd} \times NL(Lat_{cprOdd}) + 0,5) \quad (16)$$

$$Lon = DLon \times (\text{mod}(m, ni) + Lat_{cprOdd}) \quad (17)$$

Ukoliko je vrijednost geografske dužine ($longitude - lon$) veća od 180° , vrši se korekcija prema formuli: $lon = lon - 360$ (10) [11].

Visinu zrakoplova je lakše izračunati iz zaprimljenih informacija, nego što je geografsku širinu i dužinu. Podatkovni blok koji se odnosi na visinu sastoji se od 12 bitova. 48. bit po redu, tj. 8. od 12 bitova za visinu, se naziva "Q-bit" i označuje u kojoj veličini je kodirana visina. Ako je iznos "Q-bit" 1, kodiranu vrijednost množimo s 25 ft. Ako je iznos "Q-bit" 0, kodiranu vrijednost množimo sa 100 ft. Kada odredimo s kojom veličinom množimo kodiranu vrijednost "Q-bit" zanemarujemo i ostatak binarne vrijednosti pretvaramo u decimalni oblik.



Slika 3: Primjer "Q-bit" u podatkovnom bloku za visinu zrakoplova, [9]

Na primjeru iz slike 3 vidimo gdje se nalazi "Q-bit" u podatkovnom bloku i da je njegova vrijednost 1.

Također, koristeći ovaj primjer bit će prikazano izračunavanje visine iz podatkovnog bloka. Kada se odstrani "Q-bit" ostaje binarna vrijednost 00001111111, koja pretvorena u decimalni broj iznosi 127. S obzirom na to da je vrijednost "Q-bita" 1 decimalna vrijednost se množi s 25 ft, što daje rezultat 3175 ft, od kojeg oduzimamo 1000 ft, što daje konačnu vrijednost visine 2175 ft tj. 662.94 m [9].

3.2.4. Brzina zrakoplova

Poruka koja sadrži podatak o brzini zrakoplova ima $DF = 17$ i *type code* u vrijednosti 19. Postoje 4 podtipa poruka, određena s 3 bita podtipa u poruci. Podtip 1 i 2 sadrže informacije o brzini zrakoplova u odnosu na zemlju (*ground speed*). Podtip 3 i 4 sadrže informacije o zračnoj brzini zrakoplova (*airspeed*). Podtipovi 2 i 4 se koriste za zrakoplove koje lete nadzvučnom brzinom. Podtip poruke se očitava od 38. – 40. bita. Podatkovni blok o brzini također sadrži i informaciju o pravcu leta zrakoplova koja je izražena u odnosu na sjever-jug i istok zapad.

Tablica 9 prikazuje podjelu informacija u podatkovnom bloku o visini za podtip 1, podijeljenje po broju bitova s lijeva na desno, a *slika 4* prikazuje dekodiranje primljene poruke po vrstama informacija iz *tablice 9*.

Tablica 9: Podjela informacija u podatkovnom bloku o visini za podtip 1

Bit	Broj bitova	Kratica	Sadržaj
33-37	5	TC	Type code
38-40	3	ST	Subtype
41	1	IC	Intent change flag
42	1	RESV_A	Reserved = A
43-45	3	NAC	Velocity uncertainty (NAC)
46	1	S-WE	East-West velocity sign
47-56	10	V-WE	East-West velocity
57	1	S-NS	North-South velocity sign
58-67	10	V-NS	North-South velocity
68	1	VrSrc	Vertical rate source
69	1	S-Vr	Vertical rate sign
70-78	9	Vr	Vertical rate
79-80	2	RESV_B	Reserved = B
81	1	S-Dif	Diff from baro alt sign
82-88	7	Dif	Diff from baro alt

[11]

Message: 8D485020994409940838175B284F

ICAO24	DATA	CRC
8D 485020	99440994083817	5B284F

Convert DATA [99440994083817] into binary:

TC	ST	IC	RESV_A	NAC	S-EW	V-EW
10011	001	0	1	000	1	0000001001

S-NS	V-NS	VrSrc	S-Vr	Vr	RESV_B	S_Dif	Dif
1	0010100000	0	1	000001110	00	0	0010111

Slika 4: Dekodiranje poruke o visini podtipa 1, [11]

Horizontalna brzina zrakoplova (*horizontal velocity*) i pravac leta (*heading*) računaju se preko četiri vrijednosti: istok-zapad brzina (*V-WE*; *Vew*), znak istok- zapad brzine (*S-WE*; *Sew*), sjever-jug brzina (*V-NS*; *Vns*) i znak sjever-jug brzine (*S-NS*; *Sns*). Znak za istok-zapad i sjever-jug brzinu označuju smjer leta zrakoplova. Ako *Sns* ima vrijednost 1 zrakoplov leti od sjevera prema jugu, a ako je vrijednost 0 zrakoplov leti od juga prema sjeveru. Ako *Sew* ima vrijednost 1 zrakoplov leti od istoka prema zapadu, a ako je vrijednost 0 zrakoplov leti od zapada prema istoku.

Horizontalna brzina- v i pravac leta – h , u čvorovima i stupnjevima, se računa prema sljedećim formulama:

$$V_{ew} = \begin{cases} -1 \cdot (V_{ew} - 1) & \text{ako je } S_{ew} = 1 \\ V_{ew} - 1 & \text{ako je } S_{ew} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$V_{sn} = \begin{cases} -1 \cdot (V_{sn} - 1) & \text{ako je } S_{sn} = 1 \\ V_{sn} - 1 & \text{ako je } S_{sn} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$V = \sqrt{V_{we}^2 + V_{sn}^2} \quad (20)$$

$$h = \arctan2(V_{we}, V_{sn}) \cdot \frac{360}{2\pi} \quad (deg) \quad (21)$$

U slučaju negativne vrijednosti dodajemo 360°:

$$h = h + 360 \quad (\text{ako je } h < 0) \quad (22)$$

Primjer računanja pomoću tih formula:

V_{ew} : 0000001001 → 9

S_{ew} : 1

V_{sn} : 0010100000 → 160

S_{sn} : 1

$$V_{we} = -(9 - 1) = -8$$

$$V_{sn} = (160 - 1) = 159$$

$$V = 159.20 \quad (kt)$$

$$H = 185.88 \quad (deg)$$

Smjer vertikalne brzine zrakoplova se očitava iz polja S-Vr u 69. bitu. Vrijednost 0 znači da zrakoplov ide prema gore, a vrijednost 1 da ide prema dolje. Vertikalna brzina zrakoplova se očitava iz polja Vr, a očitanoj vrijednosti se oduzima 1, te se množi sa 64 da bi se dobila vrijednost u stopama po minuti (ft/min). Izračun vertikalne brzine i očitavanje smjera vertikalne brzine prikazano je slijedećim formulama:

$$Vr - bits: 000001110 \rightarrow 14$$

$$Vr: (14 - 1) \times 64 \rightarrow 832 \text{ fpm}$$

$$S - Vr: 0 \rightarrow \text{Dolje / Spuštanje}$$

Vertical Rate Source ($VrSrc$) polje određuje da li je visina izražena kao visina mjerena po barometarskom tlaku ili geometrijska visina. Ako $VrSrc$ ima vrijednost 0 onda je promjena visine izražena kao promjena barometarske visine po tlaku, a ako je vrijednost 1 onda je u pitanju geometrijska promjena visine.

Poruka podtipa 3 se koristi kada brzina u odnosu na zemlju nije dostupna, a zračna brzina jest. Struktura ove poruke je slična strukturi poruke podtipa 1, stoga će biti prikazana samo *tablica 10* koja prikazuje podjelu informacija u podatkovnom bloku i *slika 5* kao primjer dekodiranja poruke podtipa 3.

Tablica 10: podjela informacija u podatkovnom bloku o visini podtipa 3

Bit	Broj bitova	Kratica	Sadržaj
33-37	5	TC	Type code
38-40	3	ST	Subtype
41	1	IC	Intent change flag
42	1	RESV_A	Reserved-A
43-45	3	NAC	Velocity uncertainty (NAC)
46	1	S_hdg	Heading status
47-56	10	Hdg	Heading (proportion)
57	1	AS-t	Airspeed type
58-67	10	AS	Airspeed
68	1	VrSrc	Vertical rate source
69	1	S_vr	Vertical rate sign
70-78	9	Vr	Vertical rate
79-80	2	RESV_B	Reserved-B
81	1	S_Dif	Difference from baro alt, sign
82-88	7	Dif	Difference from baro alt

[11]

Message: 8DA05F219B06B6AF189400CBC33F

ICAO24	DATA	CRC
8D A05F21	9B06B6AF189400	CBC33F

Convert DATA [9B06B6AF189400] into binary:

TC	ST	IC	RESV_A	NAC	S_hdg	Hdg	AS-t	AS
10011	011	0	0	000	1	1010110110	1	0101111000

VrSrc	S-Vr	Vr	RESV_B	S_Dif	Dif
1	1	000100101	00	0	0000000

Slika 5: Dekodiranje poruke podtipa 3, [11]

Kod očitavanja pravca leta zrakoplova prvo se gleda polje *S_hdg*. Ako je vrijednost tog polja 0 onda podatci o pravcu leta nisu dostupni, a ako je vrijednost polja 1 onda se podatci o pravcu leta očitavaju iz sljedećeg polja *Hdg*. Pravac leta se računa tako da se binarna vrijednost pretvori u decimalnu koja se zatim dijeli s 1024 te množi s 360° [11].

$$h = Hdg \text{ (decimal)} \cdot \frac{360^\circ}{1024} \quad (23)$$

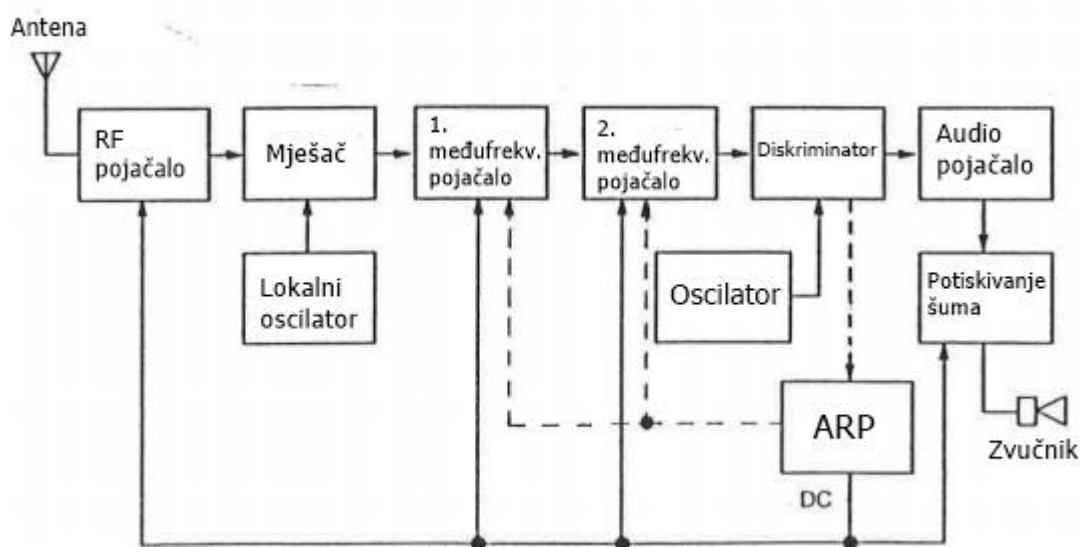
4. SDR

Software-defined radio (SDR) je radio komunikacijski sustav u kojem su komponente, koje su tradicionalno bile ukomponirane u hardveru kao npr. mješači, filteri, pojačala, modulatori, demodulatori, dekoderi itd., sada implementirane kroz softver računala ili ugrađenog sustava. Osnovni SDR sustav sastoji se od računala opremljenim zvučnom karticom ili nekim drugim analogno-digitalnim konverterom. Značajan dio obrade signala se vrši na procesoru opće namjene umjesto na posebnom hardveru.

SDR tehnologija omogućuje upotrebu više valnih oblika na jednom uređaju. Može biti prikladna za različite korisničke kategorije na javnim ili privatnim mrežama za korištenje različitih valnih oblika ili za odabir različitih opcija unutar jednog standarda valnog oblika [13].

4.1. Obrada signala na tradicionalnom radio prijemniku

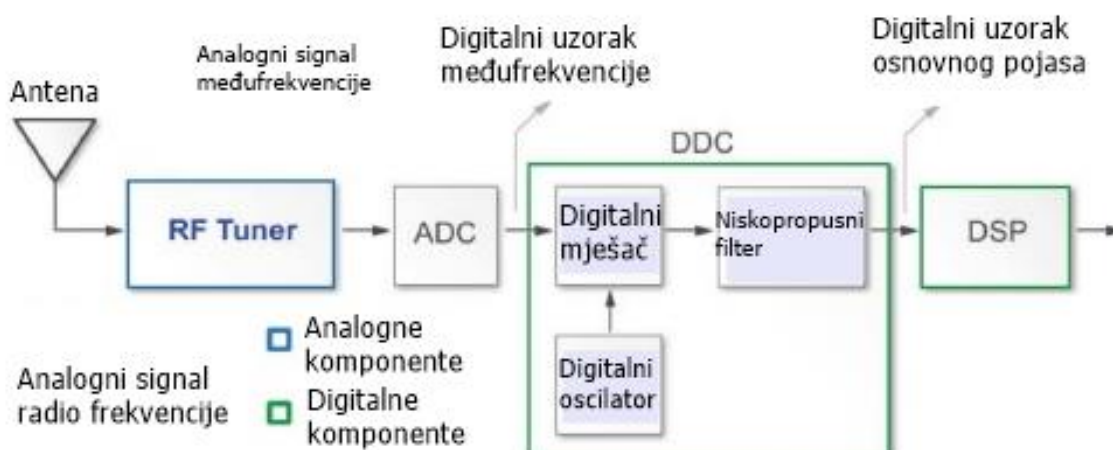
Kod VHF radio prijemnika za glasovnu komunikaciju zaprimljeni EM val se u anteni pretvara u visokofrekventni (VF) signal, koji je u tom obliku nepovoljan za obradu. Stoga se taj VF signal u mješaču (*mixer*) miješa sa signalom lokalnog oscilatora (*local oscillator*), a lokalni oscilator je superheterodinski prijemnik. Dalje se u među frekvenzijskom filteru odstranjuju svi nepoželjni produkti miješanja, osim signala međufrekvencije (*intermediate frequency - IF*) moduliranog govornim signalom koji se dalje pojačava na međufrekvenzijskom pojačalu (*IF amplifier*). Zbog oscilacije razine prijamnog signala i njegovog slabljenja koriti se sklop automatske regulacije pojačanja (*ARP*), koji nadzire rad pojačala. Nakon pojačanja signal ide na diskriminator (*detector*), koji razdvaja govorni signal od signala međufrekvencije. Dobiveni govorni signal se ponovno pojačava i na sklopu za potiskivanje šuma (*squelch*) se eliminira okolni šum i smetnje, te se preko regulatora glasnoće govorni signal pušta na zvučnik ili slušalice. Ovaj proces obrade signala prikazan je na slici 6 [14].



Slika 6: Obrada signala na tradicionalnom radio prijemniku, [14]

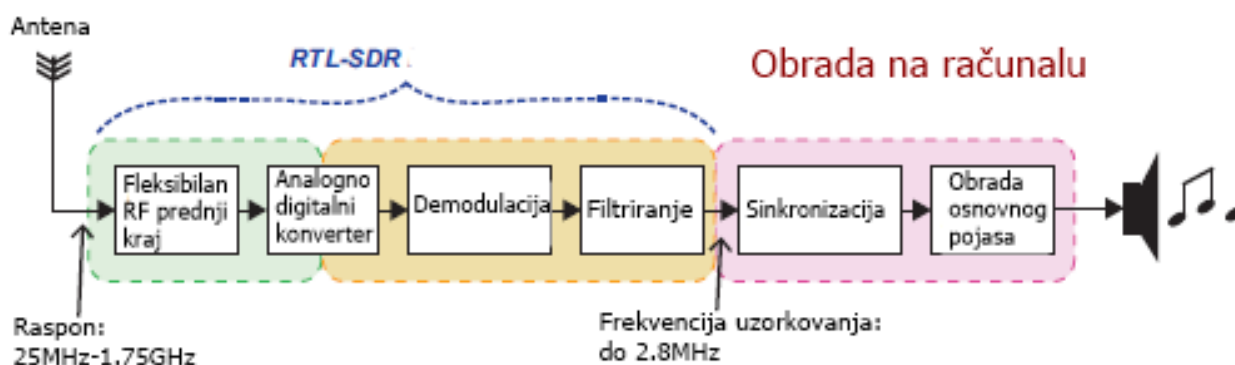
4.2. Obrada signala na SDR prijemniku

Radio frequency (RF) tuner je podsustav radija koji zaprima analogne *RF* signale i modulira ih u *IF* frekvenciju, obavljajući zadaću superheterodinskog prijemnika. To je prvi korak *SDR* obrade signala. Idući korak je pretvorba analognog signala u digitalni, što se obavlja u analogno-digitalnom pretvaraču (*Analog-to-digital converter - ADC*). Dobiveni digitalni signal dalje putuje u *Digital Down Converter (DDC)*, gdje se konvertira u signal niže frekvencije i manje brzine uzorkovanja, kako bi se pojednostavnile daljnje faze obrade signala. DDC je uobičajeno integrirani čip i ključan je dio *SDR* sustava. Sastoji se od tri glavne komponente: digitalnog mješača (*digital mixer*), digitalnog lokalnog oscilatora (*digital local oscillator*) i *Finite Impulse Response (FIR)* niskopropusnog filtera (*low-pass filter*). Digitalni mješač i lokalni oscilator mijenjaju *IF* signal u osnovni pojas, dok *FIR* niskopropusni filter ograničuje raspon frekvencija unutar pojasa krajnjeg signala. Zadnji korak obrade signala je *Digital Signal Processing (DSP)*, što između ostalog uključuje demoduliranje i dekodiranje signala. Slika 7 prikazuje blok shemu obrade signala pomoću *SDR* prijemnika [15].



Slika 7: Blok shema obrade radio signala pomoću SDR prijemnika, [15]

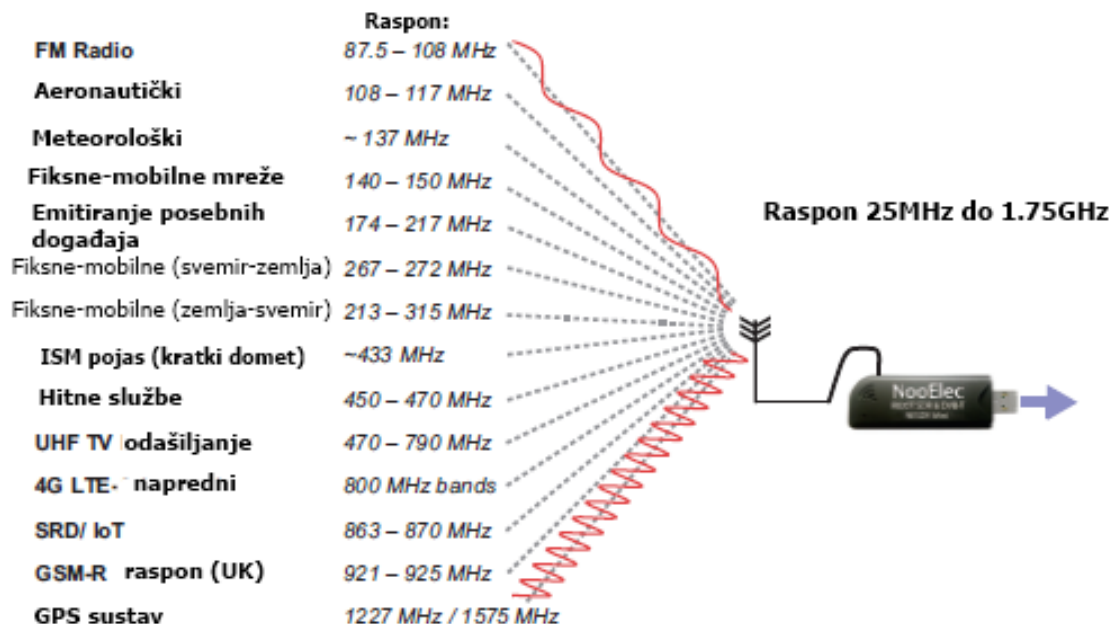
Daljnja obrada podataka odrađuje se na računalu, kao što je prikazano blok shemom na slici 8.



Slika 8: Cjelokupni proces obrade signala SDR sustavom, [16]

4.3. Primjena SDR-a

Raspon frekvencija koje SDR prijemnik može zaprimiti ovisi o anteni sustava tj. o proizvođaču sustava. Pretpostavljajući da se frekvencije nalaze unutar radnog raspona sustava i unutar dometa antene. *Slika 9* prikazuje signale dostupne za zaprimanje SDR sustavom.



Slika 9: Primjer signala dostupnih za očitavanje SDR sustavom, [16]

S obzirom na to da nije uvijek izvedivo ili praktično razvijati radio sustav koji ima sve karakteristike SDR-a, neki sustavi mogu podržavati samo neke karakteristike SDR-a, dok drugi mogu biti u potpunosti definirani softverom. Iz to razloga je definirano niz razina, u smislu onoga što je podesivo: Razine 0, 1, 2 i 3. Razina 0: nekonfigurabilan hardver, tj. radio koji se ne može mijenjati pomoću softvera. Razina 1: radio s promjenjivim softverom, ali ograničenih funkcija. Može se mijenjati snaga ili međusobna povezivost, ali ne način rada ili frekvencija. Razina 2: značajan dio sustava je definiran softverom, kao npr. frekvencija, modulacija, generiranje, detekcija, uski ili široki pojas rada itd, ali *RF* prednji kraj (*front end*) i dalje ostaje hardverski i ne može se mijenjati. Razina 3: idealni SDR na kojem granica između konfigurabilnih i nekonfigurabilnih dijelova postoji vrlo blizu antene, a prednji kraj je podesiv. Može se reći da ima punu programabilnost [16].

5. PROGRAMIRANJE SOFTVEROM DEFINIRANOG ADS-B PRIJAMNIKA

Za praktični dio ovog završnog rada korištena su dva *SDR-a*: LimeSDR-USB i RTL-SDR. Također je korišteno osobno računalo Toshiba Satellite C55-A-19D, USB 3.0 kabel, a antena je uzeta iz AirNav RadarBox sustava. U ovom poglavlju će biti detaljno opisani postupci programiranja i implementacije softvera i aplikacija korištenih za dekodiranje *ADS-B/Mode-S* poruka, prikaz podataka o zrakoplovima, te praćenje zrakoplova na karti u stvarnom vremenu.

5.1. LimeSDR

LimeSDR je SDR platforma otvorenog izvora, s mogućnošću korištenja aplikacija, koja se može koristiti za razne vrste bežične komunikacije. Može odašiljati i primati signale poput: *UMTS (Universal Mobile Telecommunications System – 3G)*, *LTE (Long Term Evolution - 4G)*, *GSM (Global System for Mobile Communications)*, *LA (Long Range)*, Bluetooth, Zigbee, *RFID (Radio-frequency identification)*, *DB (Digital broadcasting)* itd. Može se implementirati u radio astronomiji, 2G-4G baznim stanicama za mobilne uređaje, upravljanju bespilotnim letjelicama, transponderu na zrakoplovima, bežičnim tipkovnicama i miševima, sustavima za nadzor tlaka u gumama itd.

Neke od značajki i specifikacija uređaja su: *RF* primopredajnik LMS7002M, memorija od 256 MB *DDR2 SDRAM (Double data rate synchronous dynamic random-access memory)*, USB 3.0 priključak, 10 U.FL konektora, izlazna snaga do 10 dB, širina pojasa 61.44 MHz, kontinuirani raspon frekvencija 100 kHz – 3.8 GHz, oscilator Rakon RPT7050A @30.72MHz, te veličina uređaja 100 mm x 60 mm [17]. Uređaj je prikazan na slici 10.



Slika 10: LimeSDR, [17]

Za početak rada s ovim uređajem potrebno je imati U.FL-RF konektor, koji se koristi za spajanje antene i uređaja.

Također, u ovom slučaju bilo je potrebno imati i *RP-SMA (Reverse-polarity SMA)* konektor, jer nisu odgovarali polariteti antene i U.FL-RF konektora, pa su pomoću *RP-SMA* konektora uspješno spojeni. To je sve spojeno na RX1_L U.FL konektor na uređaju, koji je namijenjen za frekvencije manje od 1.5GHz.

Operativni sustav korišten na osobnom računalu za rad s ovim uređajem je Ubuntu 18.04., iz razloga što su gotovo sva programska rješenja rađena za taj operativni sustav. Postoje programi rađeni i za Windows operativni sustav, ali nisu još uvijek dovoljno razrađeni.

5.1.1. Postupak programiranja

Kao što je već ranije naglašeno, postupak programiranja koji će biti objašnjen rađen je u Ubuntu tj. Linux operativnom sustavu. Upute za instalaciju takvog operativnog sustava mogu se pronaći na službenoj Ubuntu stranici. Naredbe koje će ovdje biti nabrojane unose se, tj. zadaju se preko terminala.

Potrebni upravljački programi (driveri) su navedeni na službenoj Myriad-RF stranici. Prvi takav program je LimeSuite. To je zbirka softvera koja podržava nekoliko hardverskih platformi, uključujući LimeSDR. Instaliranje tog programa omogućuje korištenje raznih SDR aplikacija, od kojih je jedna i GNU Radio. Potrebno je naglasiti da je instalaciju potrebno izvršiti pomoću paketa/instalatera ili izvornog koda, nikako ne oboje. Za ovaj rad korišteni su *PPA (Personal Package Archive)* paketi:

```
sudo add-apt-repository -y ppa:myriadrf/drivers
```

```
sudo apt-get update
```

```
sudo apt-get install limesuite liblimesuite-dev limesuite-udev limesuite-images
```

```
sudo apt-get install soapysdr soapysdr-module-lms7
```

Ovime je uz LimeSuite instaliran i SoapySDR, još jedan od potrebnih drivera. Svaki put kada se koristi LimeSDR potrebno je povezati se s njim pomoću LimeSuite-a. S ukopčanim LimeSDR-om preko USB kabela, potrebno je ažurirati i sam uređaj naredbom:

```
LimeUtil --update
```

Nakon toga se može provjeriti jeli instalacija uspješno odrađena i provjeriti dostupne uređaje:

```
LimeUtil --info
```

```
LimeUtil --find
```

Primjer ispisa tih dviju naredbi je prikazan na *slici 11*.

```
tea@tea-SATELLITE-C55-A-19D: ~  
File Edit View Search Terminal Help  
tea@tea-SATELLITE-C55-A-19D:~$ LimeUtil --info  
#####  
## LimeSuite information summary  
#####  
  
Version information:  
Library version:      v18.04.1-myrriadrf1-bionic  
Build timestamp:      2018-04-29  
Interface version:    v2018.3.0  
Binary interface:     18.04-1  
  
System resources:  
Installation root:     /usr  
User home directory:   /home/tea  
App data directory:    /home/tea/.local/share/LimeSuite  
Config directory:      /home/tea/.limesuite  
Image search paths:  
- /home/tea/.local/share/LimeSuite/images  
- /usr/share/LimeSuite/images  
  
Supported connections:  
* FT601  
* FX3  
* PCIEXillybus  
  
tea@tea-SATELLITE-C55-A-19D:~$ LimeUtil --find  
* [LimeSDR-USB, media=USB 3.0, module=FX3, addr=1d50:6108, serial=0009070602432F19]  
  
tea@tea-SATELLITE-C55-A-19D:~$
```

Slika 11: Ispis naredbi LimeUtil

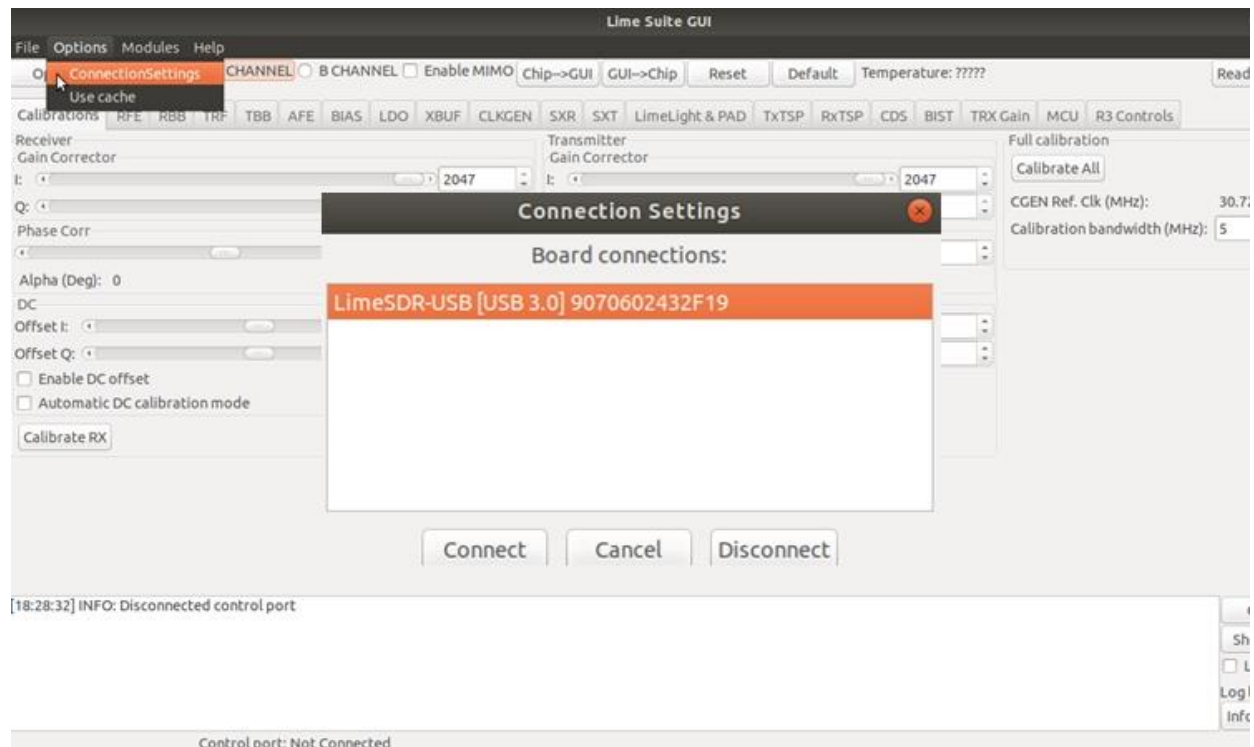
Može se provjeriti i instalacija SoapySDR drivera, a primjer ispisa je prikazan na *slici 12*, pomoću naredbe:

SoapySDRUtil --find="driver=lime"

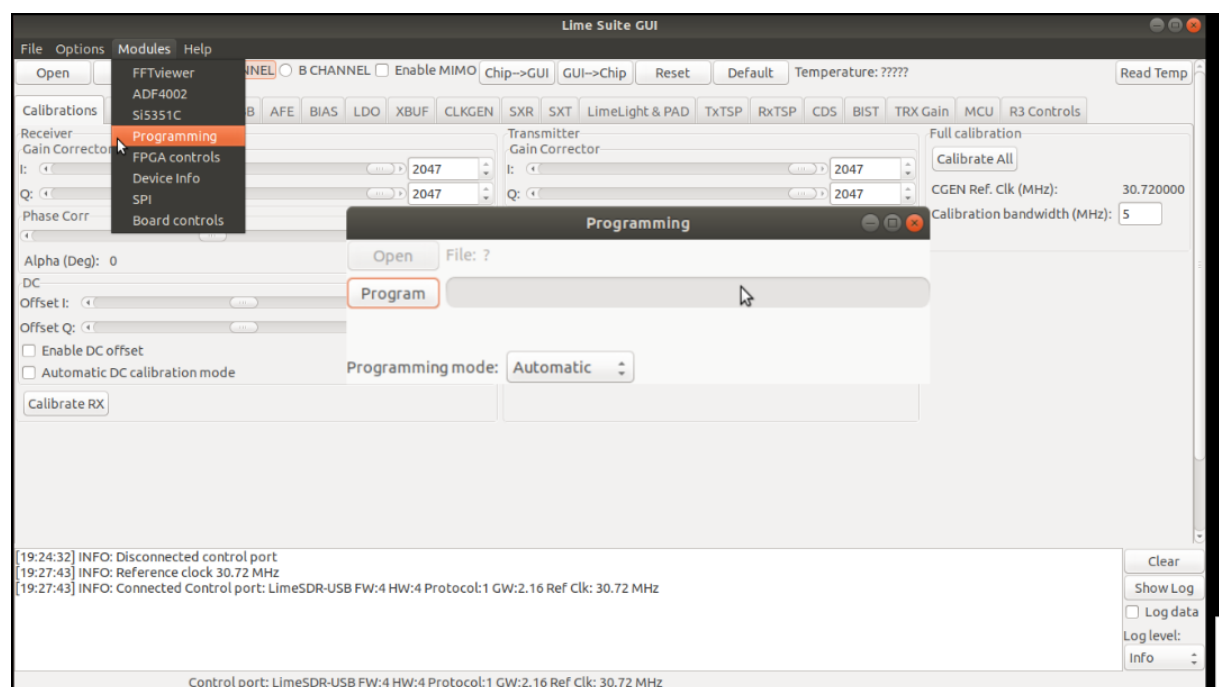
```
tea@tea-SATELLITE-C55-A-19D: ~  
File Edit View Search Terminal Help  
tea@tea-SATELLITE-C55-A-19D:~$ SoapySDRUtil --find="driver=lime"  
#####  
## Soapy SDR -- the SDR abstraction library  
#####  
  
linux; GNU C++ version 7.3.0; Boost_106501; UHD_003.010.003.000-0-unknown  
  
Found device 0  
addr = 1d50:6108  
driver = lime  
label = LimeSDR-USB [USB 3.0] 9070602432F19  
media = USB 3.0  
module = FX3  
name = LimeSDR-USB  
serial = 0009070602432F19  
  
tea@tea-SATELLITE-C55-A-19D:~$
```

Slika 12: SoapySDR Util

Ovaj idući korak radi se prije svakog pokretanja programa koji je namijenjen za korištenje LimeSDR-a. Potrebno je otvoriti LimeSuite, u izborniku *Options* odabrati *ConnectionSettings*, što otvara novi skočni prozor istog naziva, te je u njemu potrebno izabrati LimeSDR-USB i kliknuti *Connect*, kao što je prikazano na slici 13. Zatim pod *Modules* potrebno je odabrati *Programming*, što otvara skočni prozor istog naziva, oba padajuća izbornika podesiti na *Automatic* i kliknuti *Program*, kao što je prikazano na slici 14 [18].



Slika 13: Povezivanje uređaja



Slika 14: Programiranje

Idući program za instalirati je GNU Radio. To je besplatan alat otvorenog izvora, koji se koristi kod softverom definiranih radija, a koristi blokove za obradu signala. Pomoću njega se mogu obrađivati zaprimljeni podatci, ili odašiljati signali [19]. Naredba za instalaciju je:

```
sudo apt-get install gnuradio
```

Preostaje još instalirati softver koji će dekodirati ADS-B/Mode-S poruke i prikazati sve podatke o zrakoplovima na karti u stvarnom vremenu. U ovom slučaju je to gr-air-modes. Komponente potrebne za rad softvera su:

- Python ≥ 2.5
- PyZMQ
- NumPy
- SciPy
- SQLite ≥ 3.7
- CMake ≥ 2.6
- GNU Radio ≥ 3.5
- Ettus UHD ≥ 3.4

U ovom slučaju nedostajao je Ettus UHD, koji je instaliran na slijedeći način. Prvo je potrebno instalirati sve komponente, tj. pakete. Ovi paketi namijenjeni su za Ubuntu 18.04. [20].

```
sudo apt-get -y install git swig cmake doxygen build-essential libboost-all-dev libtool libusb-1.0-0 libusb-1.0-0-dev libudev-dev libncurses5-dev libfftw3-bin libfftw3-dev libfftw3-doc libcppunit-1.14-0 libcppunit-dev libcppunit-doc ncurses-bin cpufrequtils python-numpy python-numpy-doc python-numpy-dbg python-scipy python-docutils qt4-bin-dbg qt4-default qt4-doc libqt4-dev libqt4-dev-bin python-qt4 python-qt4-dbg python-qt4-dev python-qt4-doc python-qt4-doc libqwt6abi1 libfftw3-bin libfftw3-dev libfftw3-doc ncurses-bin libncurses5 libncurses5-dev libncurses5-dbg libfontconfig1-dev libxrender-dev libpulse-dev swig g++ automake autoconf libtool python-dev libfftw3-dev libcppunit-dev libboost-all-dev libusb-dev libusb-1.0-0-dev fort77 libstdl1.2-dev python-wxgtk3.0 git libqt4-dev python-numpy ccache python-opengl libgsl-dev python-cheetah python-mako python-lxml doxygen qt4-default qt4-dev-tools libusb-1.0-0-dev libqwtplot3d-qt5-dev pyqt4-dev-tools python-qwt5-qt4 cmake git wget libxi-dev gtk2-engines-pixbuf r-base-dev python-tk liborc-0.4-0 liborc-0.4-dev libasound2-dev python-gtk2 libzmq3-dev libzmq5 python-requests python-sphinx libcomedi-dev python-zmq libqwt-dev libqwt6abi1 python-six libgps-dev libgps23 gpsd gpsd-clients python-gps sqlite3 libsqlite3-dev python-numpy python-scipy
```

Dalje instaliramo Ettus UHD preko izvornog koda:

```
cd $HOME
```

```
mkdir build workarea-uhd
```

```
cd workarea-uhd
```

```
git clone https://github.com/EttusResearch/uhd
```

```
cd host
mkdir build
cd build
cmake ../
make
make test
sudo make install
sudo ldconfig
```

Kada su ispunjeni svi uvjeti, može se instalirati gr-air-modes.

```
git clone https://github.com/bistromath/gr-air-modes.git
cd gr-air-modes/
mkdir build
cd build
cmake ../
make
sudo make install
sudo ldconfig
```

5.1.2. Primjena

Kada je instalacija završena, softver se pokreće naredbom iz terminala. Postoje dvije različite aplikacije gr-air-modesa. Prva je `modes_rx`, koja daje tekstualni output dekodiranih podataka, kao što je prikazano na *slici 15*. Druga aplikacija je `modes_gui`, koja bi trebala prikazati zrakoplove na karti u stvarnom vremenu. Nažalost, pri izradi ovog praktičnog rada došlo je greške, koja nije uspješno riješena i prikazana je na *slici 16*, i nije bilo moguće pokrenuti `mode_gui`. Iz tog razloga je korišten i drugi SDR pri izradi praktičnog dijela rada.

```
File Edit View Search Terminal Help
tea@tea-SATELLITE-C55-A-19D: ~
PERIODS: 4
BUFFER_TIME: (42666 42667)
BUFFER_SIZE: 8192
BUFFER_BYTES: 65536
TICK_TIME: 0

RtApiAIsa: dump software params after installation:

tstamp_mode: NONE
tstamp_type: MONOTONIC
period_step: 1
avail_min: 2048
start_threshold: 2048
stop_threshold: -1
silence_threshold: 0
silence_size: 4611686018427387904
boundary: 4611686018427387904
(-34 4.81832570) No handler for message type 24 from 2a5c85
(-37 30.20022070) No handler for message type 24 from 467fc4
(-26 53.28063580) No handler for message type 24 from a038e4
(-36 86.95773980) No handler for message type 24 from 81b6b4
(-40 113.06038880) No handler for message type 24 from fbe6f2
(-22 130.49894340) Type 5 (short surveillance ident reply) from b076d with ident 3668 (aircraft is on the ground)
(-35 143.04740120) No handler for message type 24 from d56f64
(-43 143.07903900) No handler for message type 24 from 04b590
(-46 144.10847890) Type 5 (short surveillance ident reply) from b2f8b8 with ident 1312 (AIRBORNE ALERT)
(-48 184.52539600) Type 21 TCAS report from 38c605: (no handler for TTI=0) ident bba
(-51 193.92572370) Type 5 (short surveillance ident reply) from 9c3cc7 with ident 4010 (GROUND ALERT)
(-35 211.65756350) No handler for message type 24 from ab9ca4
(-51 236.93836080) Type 5 (short surveillance ident reply) from 65c480 with ident 4134 (AIRBORNE ALERT)
(-44 237.44446520) No handler for message type 24 from b11011
(-33 271.26200490) Type 5 (short surveillance ident reply) from 9cd994 with ident 4136 (GROUND ALERT)
(-45 273.00560480) No handler for message type 24 from b2a401
(-28 273.22901180) Type 4 (short surveillance altitude reply) from 324952 at 3550ft (SPI ALERT)
(-23 278.16170050) Type 5 (short surveillance ident reply) from 532c43 with ident 3424 (GROUND ALERT)
(-47 311.80656830) Type 21 link capability report from b47f82: ACS: 0x77375, BCS: 0xaeaf1, ECS: 0x3a, continues 2 ident 151a
(-50 315.87782250) No handler for message type 24 from ccf4c5
```

Slika 15: Tekstualni ispis naredbe `modes_rx`

Na *slici 16* vidi se da se tekstualni ispis naredbe `modes_rx` sastoji od type coda ADS-B poruke i ICAO adresa Mode-S transpondera.

```
File Edit View Search Terminal Help
tea@tea-SATELLITE-C55-A-19D: ~
tea@tea-SATELLITE-C55-A-19D:~$ modes_gui
Traceback (most recent call last):
  File "/usr/local/bin/modes_gui", line 24, in <module>
    from PyQt4 import QtCore, QtGui, QtWebKit
ImportError: cannot import name QtWebKit
tea@tea-SATELLITE-C55-A-19D:~$
```

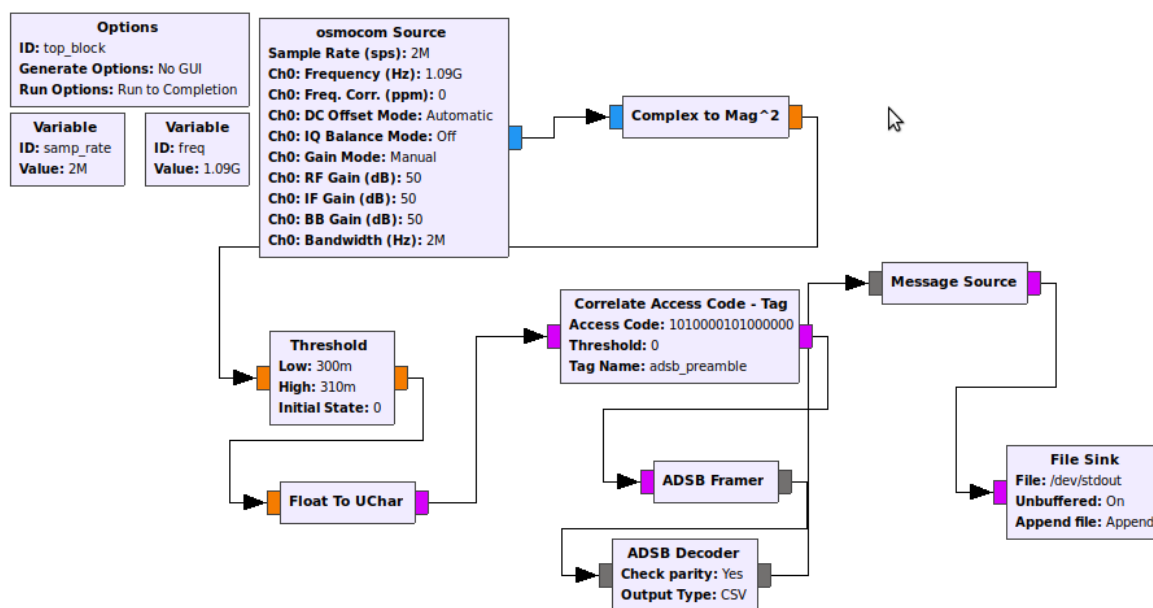
Slika 16: Greška pri pokretanju `modes_gui`

5.1.3. Dekodiranje ADS-B poruka

Kao posebno poglavlje objašnjeno je dekodiranje ADS-B poruka koristeći GNU Radio program i RTL-SDR. RTL-SDR uređaj i njegove karakteristike detaljno su objašnjeni u poglavlju 5.2.

Za dekodiranje ADS-B poruka korišteni su Python "framer" i dekođer blokovi za obradu ADS-B poruka u GNU Radiju. Blokovi koji su korišteni za programiranje u GNU Radiju, tj. grafikon protoka za završnu obradu protoka je prikazani na slici 17.

Grafikon protoka koristi zadani Osmocom izvor s postavkama dobitka koje odgovaraju i RTL-SDR uređaju. Brzina uzorkovanja je postavljena na vrijednost 2000000 sps (*samples per second* - uzorka po sekundi), a frekvencija Ch0 na 1.09 GHz, tj. 1090 MHz. RF dobitak je postavljen na vrijednost 50 dB, kao i dobitak osnovnog pojasa (*Base Band* - BB) i dobitak frekvencije srednjeg pojasa (*Intermediate Frequency Band* - IF). Širina osnovnog pojasa je 2000000 Hz [25].



Slika 17: Grafikon protoka za obradu poruka

Kada se grafikon pokrene prikazuju se dekodirane ADS-B poruke u stvarnom vremenu, kao što je prikazano na slici 18. Svaka poruka sadrži ICAO adresu Mode S transpondera, određenu informaciju i type code koji označava o kojoj se vrsti informacije radi. Poruke koje su primljene sa zrakoplova u ovom slučaju se sadržavale informacije o pozivnom znaku, brzini, headingu, te geografskoj širini i dužini. Prikaz tih podataka u GNU radiju nije čitak, pa su ti podatci prikazani u tablici 11.

Id		Value
Imports		
Variables		
freq		1090e6
samp_rate		2e6

49D365,,,,,42.58,18.22,0,17,5,11
49D365,,153,121,,,17,5,19
49D365,,,,,,11,5,0
49D365,,,,,,11,5,0
49D365,,,,,42.58,18.22,0,17,5,11
49D365,,,,,36.61,84.26,1,11,7,10
49D365,,,,,36.61,84.26,1,11,7,10
49D365,,,,,36.61,84.26,1,11,7,10
49D365,,151,116,,,17,7,19
49D365,,150,116,,,17,7,19
49D365,,,,,36.61,84.26,1,11,7,10
49D365,,,,,36.61,84.26,1,11,7,10
49D365,,149,117,,,17,7,19
49D365,,,,,36.58,84.21,0,17,7,11
49D365,,,,,42.58,18.23,1,17,7,11
49D365,,,,,36.61,84.26,1,11,7,10
49D365,,150,117,,,17,7,19
49D365,,,,,36.58,84.21,0,17,7,11
49D365,,,,,36.61,84.26,1,11,7,10
49D365,,,,,42.58,18.23,1,17,7,11
49D365,,,,,36.61,84.26,1,11,7,10
49D365,,151,117,,,17,7,19
49D365,,,,,36.61,84.26,1,11,7,10
49D365,,,,,42.57,18.24,1,17,7,11
49D365,,,,,42.57,18.24,1,17,7,11
49D365,,,,,42.57,18.24,1,17,5,11
49D365,,149,117,,,17,5,19
49D365,TVP7870,,,,,17,5,4
49D365,,,,,42.57,18.24,1,17,5,11
49D365,,149,117,,,17,5,19
49D365,,,,,,11,5,0
49D365,,,,,42.57,18.24,0,17,5,11
49D365,,150,117,,,17,5,19
49D365,,,,,42.57,18.24,0,17,5,11
49D365,,,,,42.57,18.24,1,17,5,11
49D365,,,,,,11,5,0
49D365,,150,118,,,17,5,19

Slika 18: Dekodirane ADS-B poruke

Tablica 11: Prikaz podataka iz dekodiranih ADS-B poruka

ICAO trasponder	Pozivni znak	Brzina (kts)	Heading (°)	Geografska širina	Geografska dužina	Type code
501E17						1,11,5,15
508340						17,5,19
508340		153	117			17,5,19
508340				42.63	18.10	1,17,5,12
508340	TVS3AC					17,5,4
440039		188	118			17,7,19
440039				42.62	18.12	1,17,5,11
440039	AUA731D					17,5,4
440039		175	118			17,5,19
440039		164	117			17,5,19
440039		151	117			17,5,19
4062D5		265	206			17,5,19
4062D5	EXS96B					17,5,4
4062D5		263	208			17,5,19
49D365				42.58	18.22	17,5,11
49D365		151	116			17,7,19
49D365	TVP7870					17,5,4
49D365				42.57	18.24	17,5,11

5.2. RTL-SDR

RTL-SDR 820T2 je prvotno namijenjen za prijam *DVB-T* televizijskog signala, ali se došlo do zaključka da se može izravno pristupiti sirovim podacima na 820T2 čipu, što je omogućilo da se prenamijeni u širokopojasni *SDR*. Koriste ga mnogi amateri i hobisti jer je cjenovno najpristupačniji *SDR* na tržištu, jednostavan je za korištenje i dosta je softvera i programa razvijeno baš za njega. Između ostaloga može se koristiti za: slušanje frekvencije kontrole letenja, dekodiranje *ADS-B/ModeS* poruka, slušanje lokalnih radio stanica, primanje i dekodiranje *GPS* signala, primanje vremenskih satelitskih slika, slušanje Međunarodne svemirske stanice, itd.

Uređaj je prikazan na *slici 19*. U paketu s uređajem dolazi i mala štapna antena, koja u ovom slučaju nije korištena, jer su navoji na stalku antene odgovarali već prije spomenutoj anteni koja je uzeta iz AirNav RadarBox sustava, a koja je svojom dužinom i polarizacijom već prilagođena za hvatanje signala sa zrakoplova. Može se koristiti i ta štapna antena koja dolazi s uređajem, ali ona ima puno manji domet. U paketu također dolazi i mali CD koji služi za programiranje uređaja za obradu signala digitalne televizije. To se nipošto ne smije instalirati na uređaj, jer se nakon toga ne može preprogramirati za obradu signala koji nama trebaju.



Slika 19: RTL-SDR uređaj

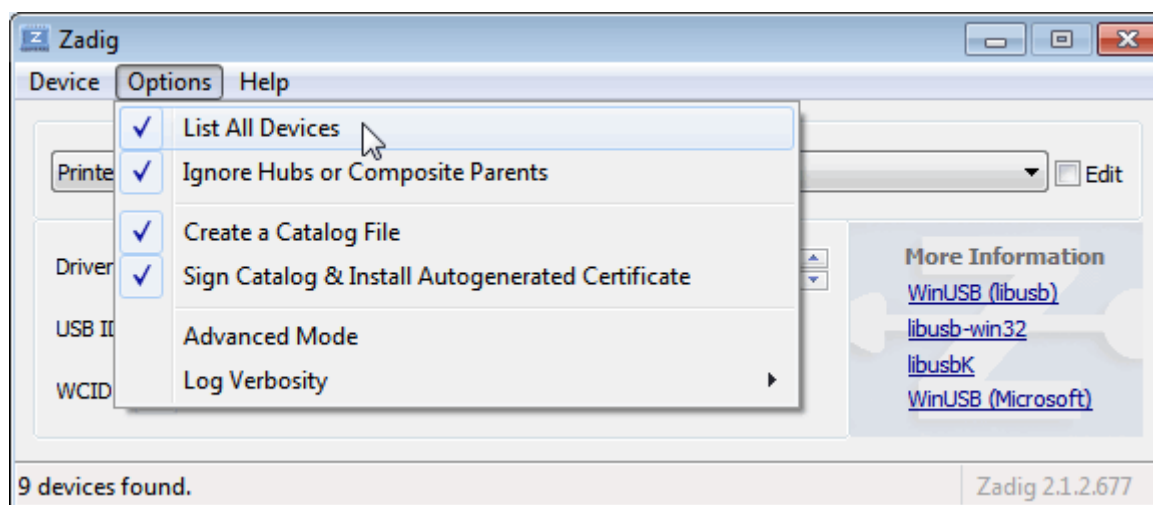
Raspon frekvencija uređaja je od 24 – 1766 MHz. Maksimalna brzina uzorkovanja je 3.2 MS/S, ali je uređaj nestabilan pri toj brzini. Maksimalna stabilna brzina uzorkovanja je 2.4 MS/S. Izvorna razlučivost uređaja je 8 bita, ali učinkoviti broj bita se procjenjuje na ≈ 7 . Impedancija je približno 75Ω [21].

5.2.1. Postupak programiranja

Ovaj uređaj je relativno lako isprogramirati da dekodira i obrađuje *ADS-B/ModeS* poruke. Ovaj dio rada odrađen je u Windows 10 operativnom sustavu. Potreban je driver koji će preprogramirati uređaj, softver za dekodiranje poruka i softver koji će te podatke prikazati na karti u stvarnom vremenu.

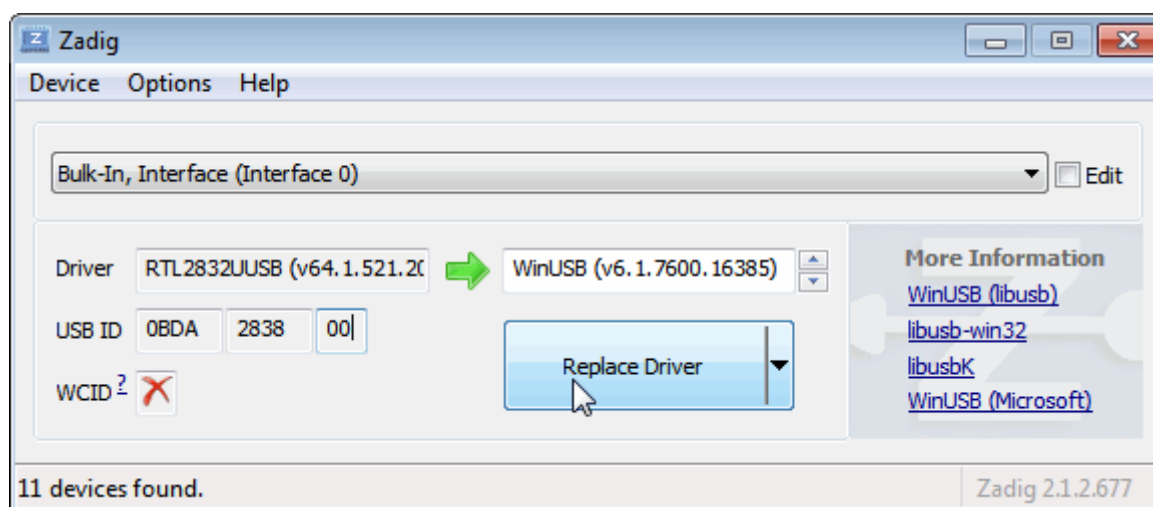
Kao softver za dekodiranje poruka je u ovom radu korišten SDR#, koji kada se snimi dolazi zajedno s aplikacijom Zadig koja instalira drivere za razne *USB-ove*. U ovom slučaju nije izravno snimljen SDR#, već je snimljena zrcaljena datoteka od 19.5.2014. Snimljene datoteke su komprimirane, pa ih treba raspakirati. Kada se uđe u raspakirane datoteke, prvo je potrebno ukopčati uređaj preko USB-a, zatim pokrenuti aplikaciju Zadig. Potrebno je naglasiti i da su sve aplikacije i softveri u toj datoteci u .exe obliku, ali pokretanje tog oblika neće ih trajno instalirati na računalo, već svaki put kada se aplikacija koristi potrebno ju je ponovno pokrenuti preko .exe oblika.

Kada je Zadig aplikacija pokrenuta potrebno je pod *Options* odabrati *List all devices*, kao što je prikazano na slici 20.



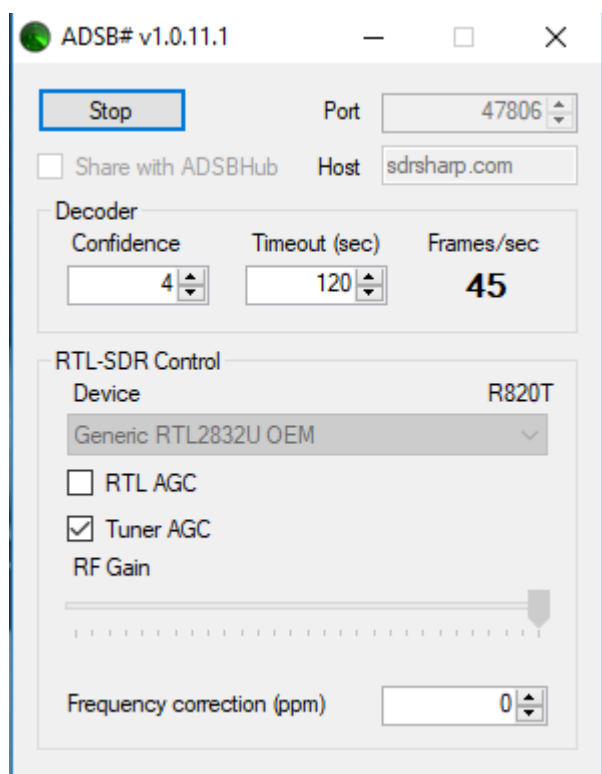
Slika 20: Zadig Options, [22]

Zatim je u padajućem izborniku potrebno odabrati *Bulk-In, Interface (Interface 0)*, provjeriti da je *WinUSB* ciljni driver, te kliknuti *Replace Driver*, kao što je prikazano na slici 21 [22].



Slika 21: Zadig reinstalacija drivera, [22]

Nakon ovog koraka uređaj je spreman za uporabu. U datoteci SDR# nalazi se i aplikacija ADSBSharp. Pokretanjem te aplikacije pojavljuje se prozor prikazan na slici 22.



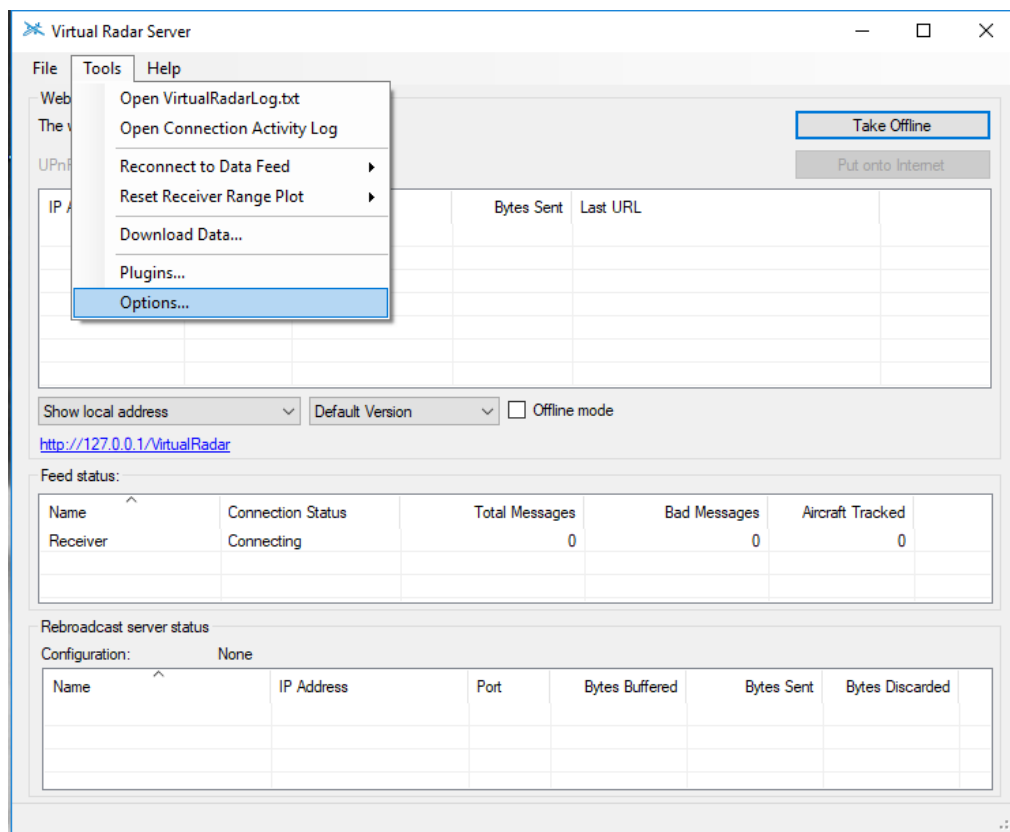
Slika 22: ADSBSharp

Potrebno je odabrati vlastiti uređaj pod Device, i provjeriti jesu li sve postavke namještene kao na *slici 20*, te kliknuti *Start*. Ako se *Frames/sec* podatci promijene, tj. pokretanjem aplikacije počnu rasti iznad 0, to znači da je sve uspješno spojeno i aplikacija radi [23]. Ovime je instaliran softver koji će dekodirati *ADS-B* poruke. Potreban je još samo softver koji će te podatke prikazati.

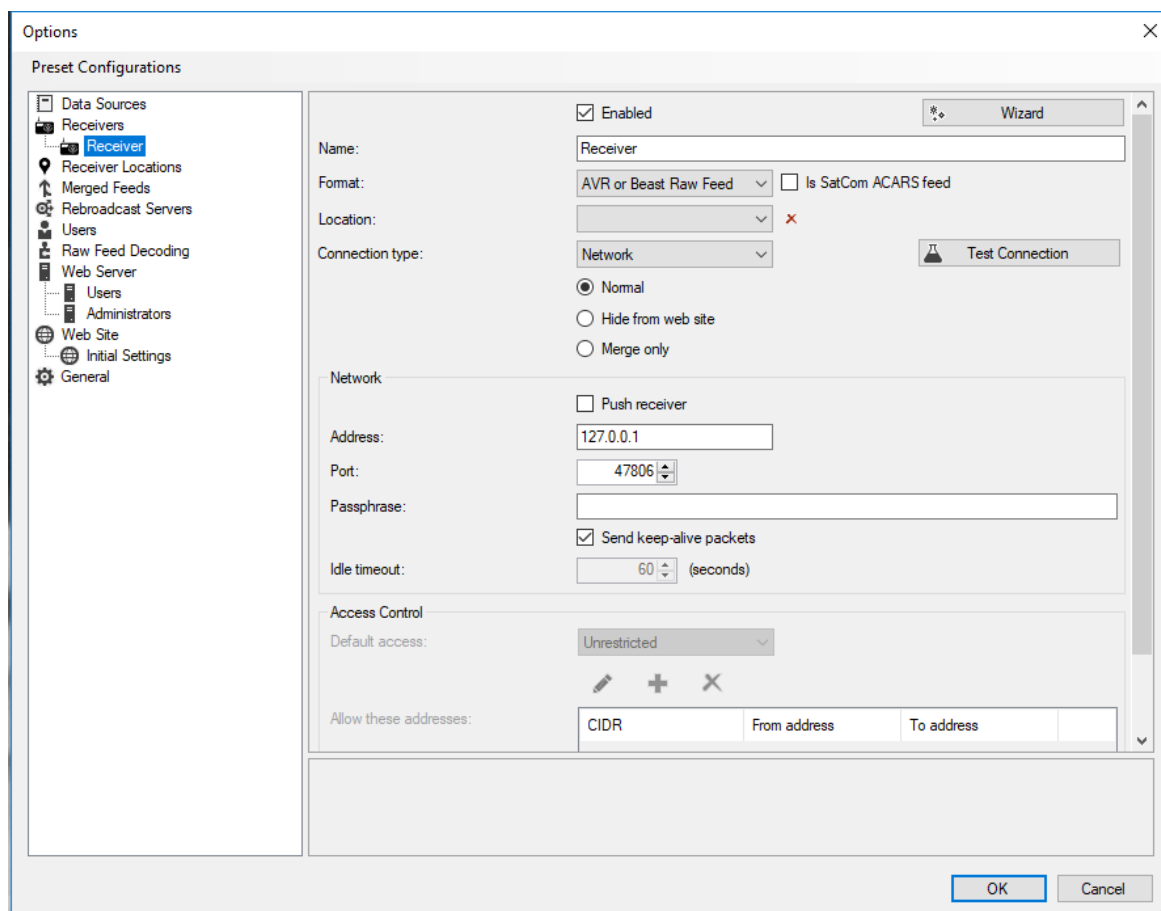
U ovom radu je u svrhu prikazivanja podataka dobivenih dekodiranjem poruka korišten program Virtual Radar Server.

To je .NET aplikacija otvorenog izvora koja pokreće lokalni web poslužitelj. Može se povezati preko bilo kojeg novijeg internet preglednika i prikazati pozicije zrakoplova putem Google karata. Uvjeti za rad su jedino imati operativni sustav Windows XP, ili noviji, te imati instaliran Microsoft .NET Framework 3.5.5., ili noviji.

Program se može snimiti sa službene Virtual Radar Server stranice. Instalira se kao i drugi programi za Windows, za razliku od dvije prethodno spomenute aplikacije. Nakon instalacije može se pokrenuti program. Pokrenuti program izgleda kao na *slici 23*. Potrebno je pod *Tools* odabrati *Options*. To otvara novi prozor istog naziva. U tom prozoru pod *Receivers* treba odabrati *Receiver* i onda u sljedeća polja odabrati: *Format* → *AVR or Beast Raw Feed*; *Connection Type* → *Network*; *Address* → *127.0.0.1*; *Port* → *47806*, kao što je prikazano na *slici 24*. Kada su sva polja ispravno popunjena klik na OK vraća prethodni prozor, kao na *slici 22*, gdje se ispod opcije *Show local address* nalazi link. Klik na taj link otvara Google kartu u internet pregledniku na kojoj su prikazani zrakoplovi u stvarnom vremenu [24].

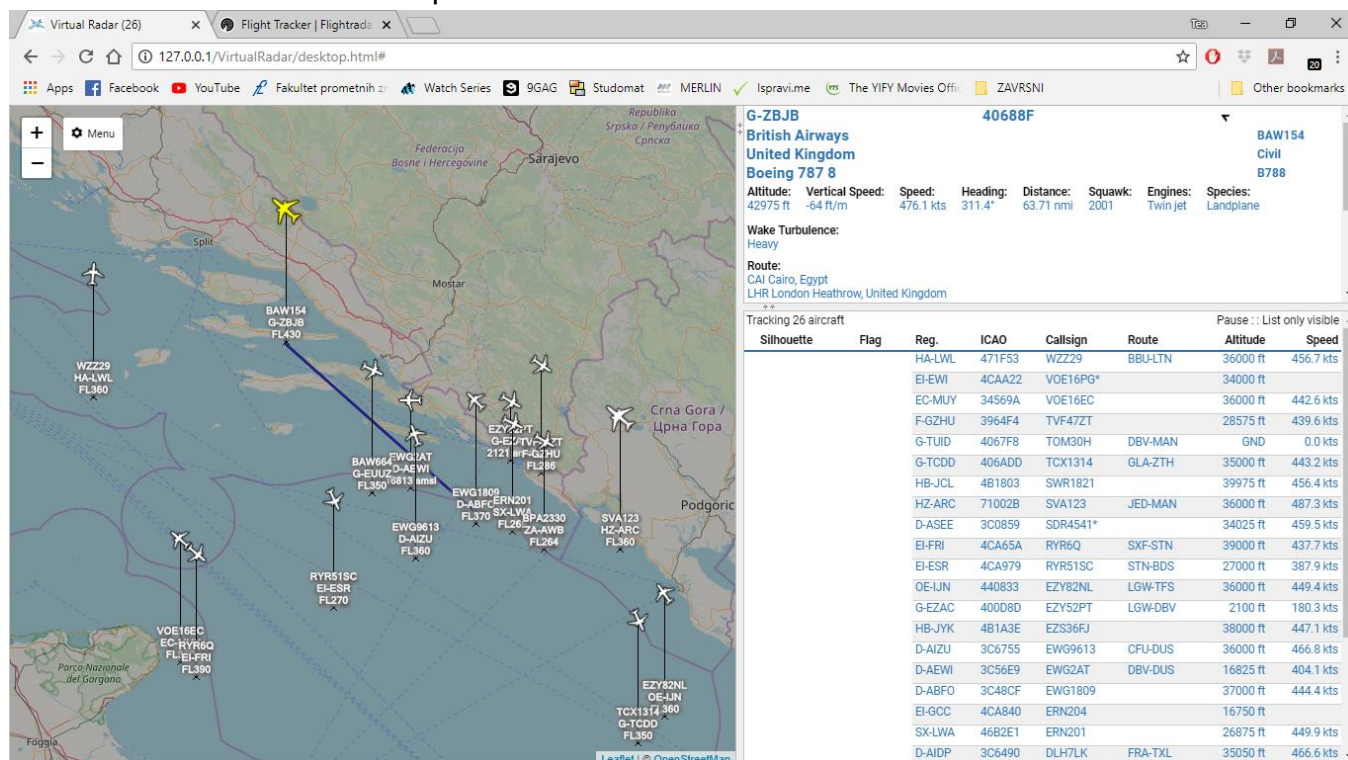


Slika 23: Virtual Radar Server



Slika 24: Virtual Radar Server - postavljanje prijmnika

5.2.2. Prikaz dekodiranih podataka

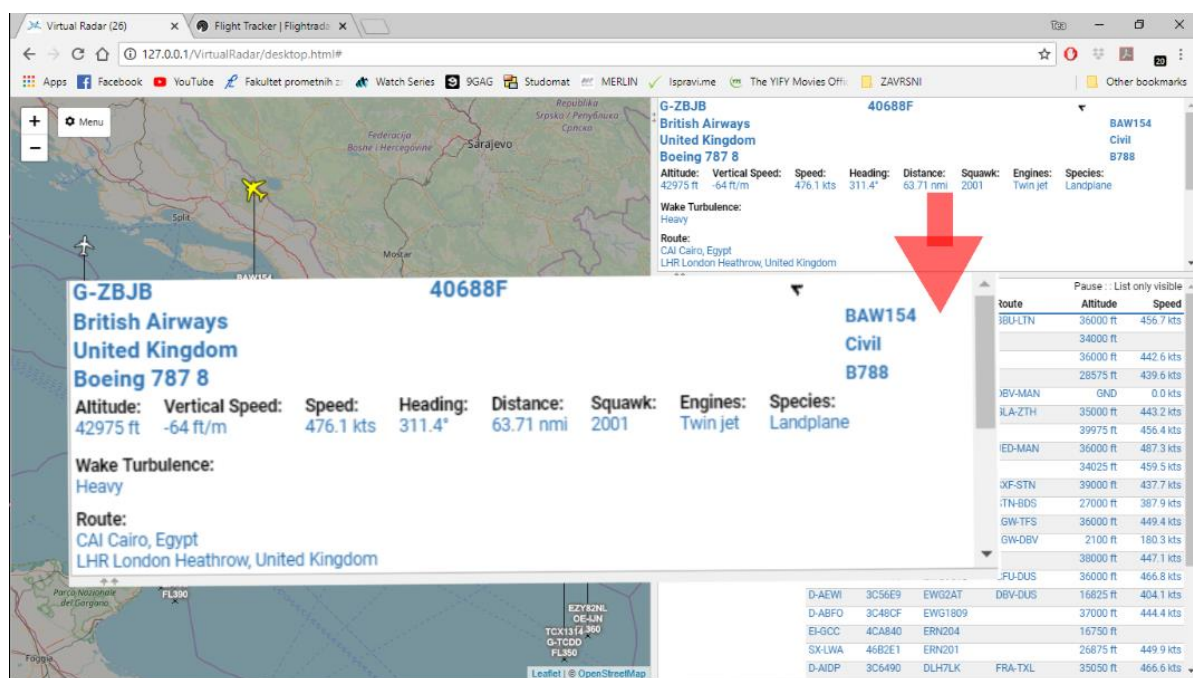


Slika 25: Virtual Radar Server - prikaz podataka u stvarnom vremenu

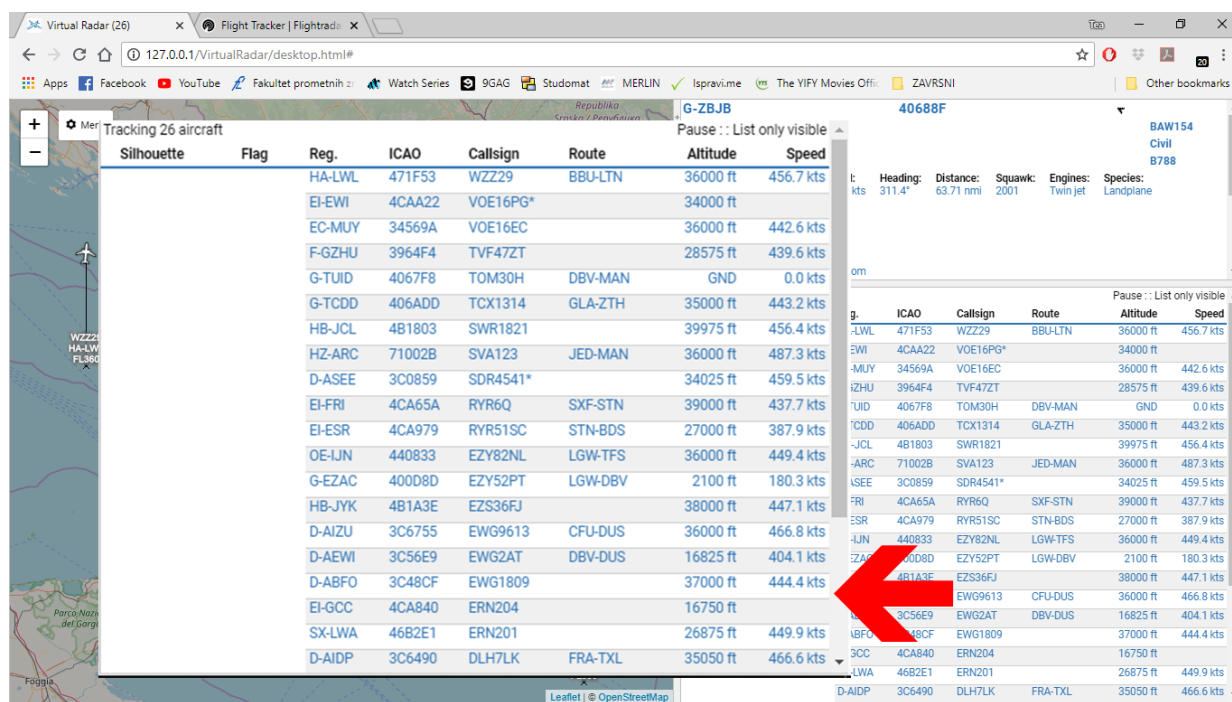
Prikaz dekodiranih podataka, kao što se vidi na slici 25, sastoji se od 3 dijela. Prvi dio je Google karta na kojoj se može pratiti kretanje zrakoplova u stvarnom vremenu. Na toj karti se prikazuju i podatci o zrakoplovu. Količina i redoslijed tih podataka se može mijenjati s raznim filterima pod *Menu*. U ovom slučaju na karti se pored svakog zrakoplova ispisuju podatci o pozivnom znaku, registraciji i razini leta. Potrebno je naglasiti da slička zrakoplova ne predstavlja poziciju zrakoplova, već je predstavljena x-om ispod te sličice.

Kada se klikom odabere pojedini zrakoplov, pored karte se o njemu mogu iščitati relevantne informacije, kao što je prikazano na slici 26. Može se vidjeti registracija zrakoplova, naziv zrakoplovne kompanije, zemlja podrijetla, tip zrakoplova, visina, vertikalna brzina, horizontalna brzina, heading, itd. Također se vidi i slika tipa zrakoplova, ali to u ovom slučaju nije prikazano zbog velike količine informacija na ekranu.

Ispod podataka o pojedinom zrakoplovu nalazi se popis svih zrakoplova koji su u dometu antene i koji su prikazani na karti, kao što se može vidjeti na slici 27. Tu se može iščitati registracija, pozivni znak, ICAO adresa transpondera, ruta, visina i brzina svakog zrakoplova.

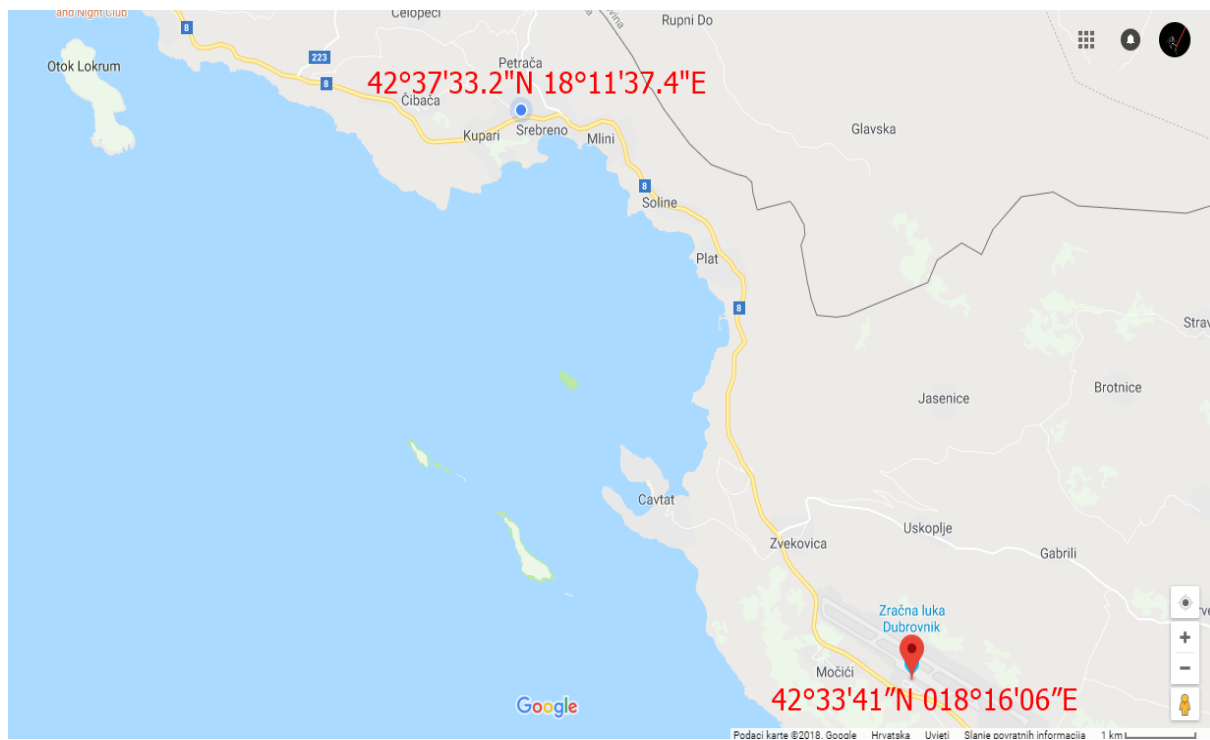


Slika 26: Virtual Radar Server - informacije o pojedinom zrakoplovu



Slika 27: Virtual radar Server - popis svih zrakoplova u dometu

Uređaj i antena bili u postavljeni na geografskoj lokaciji 42°37'33.2"N 18°11'37.4"E, koja je približno 15 km udaljena od Zračne luke Dubrovnik, čije su koordinate 42°33'41"N 018°16'06"E. Obje lokacije su prikazane na slici 28.



Slika 28: Geografske lokacije snimanja i zračne luke

6. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu objašnjen je princip rada *ADS-B* sustava. Naglašeno je da je svojim radom *ADS-B* sličan radu sekundarnog radara, ali da mu je prednost što mu nije potreban sustav zemaljskih stanica, već određuje poziciju zrakoplova pomoću *squitter* poruka koje su odaslane bez prethodnog prizivanja. Predviđa se da će *ADS-B* sustav u budućnosti zamijeniti *SSR* sustave, što će povećati sigurnost zračnog prometa, kao i omogućiti veći protok prometa.

Drugi fokus ovog rada bio je *SDR*. Softverom definirani radio nije novost na tržištu, ali se počinje sve više koristiti u širokoj primjeni. U ovom slučaju korišten je za dekodiranje *ADS-B* poruka, ali je njegova primjena daleko šira od toga. Može se koristiti za jednostavne stvari kao slušanje lokalne radio stanice, do ozbiljnijih stvari poput upravljanja bespilotnim letjelicama. U radu je detaljno opisana njegova prednost nad konvencionalnim radijima, ponajviše njegova programabilnost da služi svrsi koja je korisniku potrebna.

Krajnje, praktični dio rada pokazao je da nije jednako lako raditi sa svim vrstama *SDR-a*. LimeSDR je prema performansama mnogo jači i ozbiljniji uređaj od RTL-SDRa, ali upravo zbog toga i nije toliko široko rasprostranjen i nema toliko gotovih programskih rješenja za njega. Dok je RTL-SDR više amaterski, tj. hobistički uređaj, koji je cjenovno pristupačan i iz tog razloga je došao do više ljudi i više je programa prilagođeno za rad s njim.

LITERATURA

1. Morales A. L., A guide to Global Surveillance, ICAO dokumenti, 2014. Preuzeto sa: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/ADSBIMP/ADSBIMPP12.pdf>, svibanj 2018.
2. Hrvatska kontrola zračne plovidbe, Sustavi za nadzor zračne plovidbe, <http://www.crocontrol.hr/default.aspx?id=66>, svibanj 2018.
3. Hrvatska kontrola zračne plovidbe, Sustav za nadzor i vođenje prometa na zagrebačkoj zračnoj luci, <http://www.crocontrol.hr/default.aspx?id=3650>, svibanj 2018.
4. Wikipedia, Primary Radar, https://en.wikipedia.org/wiki/Primary_radar, svibanj 2018.
5. Wikipedia, Secondary Surveillance Radar, https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary_surveillance_radar, svibanj 2018.
6. Multilateration, Surveillance, <http://www.multilateration.com/surveillance/multilateration.html>, svibanj 2018.
7. Wikipedia, Automatic Dependent Surveillance – Broadcast, https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_dependent_surveillance_%E2%80%93_broadcast#Physical_layer, svibanj 2018.
8. Martinez, A., Guide on Technical and Operational Considerations for the Implementation of ADS-B in the SAM Region, Peru, 2013. Preuzeto sa: <https://www.icao.int/SAM/eDocuments/ADSB%20Guide%20Vs1.2%20English.pdf>, svibanj 2018.
9. Abdulrazaq A., Abdulmalik S., Ashraf A., Mahmoud T., Habeeb B., Optimum Receiver for Decoding Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) Signals, American Journal of Signal Processing 2015, 5(2): 23-31, preuzeto sa: https://www.researchgate.net/publication/318940434_Optimum_Receiver_for_Decoding_Automatic_Dependent_Surveillance_Broadcast_ADS-B_Signals?_sg=JyXIWRXYVNe4f5ZF9dtTgBhTifYZUIK0LDZI01JkZh__hybG7q6taY85nClc3G6qZSYSAF1oNA, svibanj 2018.
10. Ivošević, J., Nastavni materijali: Radio i radarski sustavi, Automatic dependant surveillance, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb 2017.
11. Mode S, The 1090MHz Riddle, <http://mode-s.org/decode/index.html>, svibanj 2018.
12. Hriadel, D.: System for automatic aircraft observation and recording based on ADS-B, PhD thesis, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Control Engineering, Prague 2016
13. Wikipedia, Software Defined Radio, https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_radio, svibanj 2018.

14. Bucak, T., Nastavni materijali: Uređaji i sustavi u kontroli zračne plovidbe, Sveučilište u Zagrebu, M
15. Machado, F., Software Defined Radio: Basic Principles and Applications, Facultad de Ingeniería 2015, vol.24, n.38, pp.79-96, preuzeto sa:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292015000100007, svibanj 2018.
16. Radio Electronics, Software Defined Radio, SDR, Tutorial, <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/sdr/software-defined-radios-tutorial.php>, lipanj 2018.
17. Lime Microsystems, LimeSDR, <https://limemicro.com/products/boards/limesdr/>, kolovoz 2018.
18. Myriad RF, Lime Suite, https://wiki.myriadrf.org/Lime_Suite, kolovoz 2018.
19. GNU Radio, InstallingGR, <https://wiki.gnuradio.org/index.php/InstallingGR>, kolovoz 2018.
20. Ettus Research, Implementation of an ADS-B/Mode-S Receiver in GNU Radio, https://kb.ettus.com/Implementation_of_an_ADS-B/Mode-S_Receiver_in_GNU_Radio, kolovoz 2018.
21. RTL-SDR, About RTL-SDR, <https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/>, kolovoz 2018.
22. RTL-SDR, Getting the RTL-SDR to Work in Windows 10, <https://www.rtl-sdr.com/tag/zadig/>, kolovoz 2018.
23. RTL-SDR, ADSB-Sharp, <https://www.rtl-sdr.com/adsb-aircraft-radar-with-rtl-sdr/adsb-sharp/>, kolovoz 2018.
24. RTL-SDR, Cheap ADS-B Aircraft Radar <https://www.rtl-sdr.com/adsb-aircraft-radar-with-rtl-sdr/>, kolovoz 2018.
25. Github, GNU Radio ADSB decoder and framer, <https://github.com/wnagele/gr-adsb>, kolovoz 2018.

POPIS SLIKA

Slika 1: Dijelovi ADS-B poruke, [10]	7
Slika 2: Odabir parne poruke za geografsku širinu, [11]	11
Slika 3: Primjer "Q-bita" u podatkovnom bloku za visinu zrakoplova, [9]	12
Slika 4: Dekodiranje poruke o visini podtipa 1, [11]	14
Slika 5: Dekodiranje poruke podtipa 3, [11]	16
Slika 6: Obrada signala na tradicionalnom radio prijemniku, [14]	18
Slika 7: Blok shema obrade radio signala pomoću SDR prijemnika, [15]	19
Slika 8: Cjelokupni proces obrade signala SDR sustavom, [16]	19
Slika 9: Primjer signala dostupnih za očitavanje SDR sustavom, [16]	20
Slika 10: LimeSDR, [17]	21
Slika 11: Ispis naredbi LimeUtil	23
Slika 12: SoapySDR Util	23
Slika 13: Povezivanje uređaja	24
Slika 14: Programiranje	24
Slika 15: Tekstualni ispis naredbe modes_rx	27
Slika 16: Greška pri pokretanju modes_gui	27
Slika 17: Grafikon protoka za obradu poruka	28
Slika 18: Dekodirane ADS-B poruke	29
Slika 19: RTL-SDR uređaj	31
Slika 20: Zadig Options, [22]	32
Slika 21: Zadig reinstalacija drivera, [22]	32
Slika 22: ADSBSharp	33
Slika 23: Virtual Radar Server	34
Slika 24: Virtual Radar Server - postavljanje prijamnika	34
Slika 25: Virtual Radar Server - prikaz podataka u stvarnom vremenu	35
Slika 26: Virtual Radar Server - informacije o pojedinom zrakoplovu	36
Slika 27: Virtual radar Server - popis svih zrakoplova u dometu	36
Slika 28: Geografske lokacije snimanja i zračne luke	37

POPIS TABLICA

Tablica 1: Kratice i funkcije dijelova ADS-B poruke	7
Tablica 2: Vrijednosti type code-a i završetka.....	8
Tablica 3: Primjer poruke u heksadecimalnom numeričkom sustavu	8
Tablica 4: Postupak dekodiranja podatkovnog bloka	9
Tablica 5: Broj zona zemljopisnih dužina (NL)	10
Tablica 6: Računanje geografske širine i dužine CPR metodom.....	10
Tablica 7: Pretvorba binarnog oblika u decimalni	10
Tablica 8: Vrijednosti razvrstane kao parne i neparne poruke	10
Tablica 9: Podjela informacija u podatkovnom bloku o visini za podtip 1.....	14
Tablica 10: podjela informacija u podatkovnom bloku o visini podtipa 3	16
Tablica 11: Prikaz podataka iz dekodiranih ADS-B poruka	30

POPIS KRATICA

<i>ADC: Analog-to-digital converter</i>	20
<i>ADS: Automatic Dependent Surveillance</i>	5
<i>ADS-B: Automatic Dependent Surveillance - Broadcast</i>	2
<i>ADS-C: Automatic Dependent Surveillance - Contract</i>	2
<i>ARP: automatska regulacija pojačanja</i>	19
<i>A-SMGCS: Advanced - Surface Movement Guidance & Control System</i>	2
<i>ATIS: Automatic Terminal Information Service</i>	6
<i>BB: Base Band</i>	30
<i>CA: capability</i>	7
<i>CPR: Compact position reporting</i>	9
<i>DB: Digital broadcasting</i>	23
<i>DDC: Digital Down Converter</i>	20
<i>DDR2 SDRAM: Double data rate synchronous dynamic random-access memory</i>	23
<i>DF: Downlink format</i>	7
<i>DSP: Digital Signal Processing</i>	20
<i>EM: Elektromagnetski valovi</i>	3
<i>ES: extended squitter</i>	6
<i>EZY: easyJet</i>	8
<i>F: frame</i>	10
<i>FIR: Finite Impulse Response</i>	20
<i>FIS-B: Flight Information Service – Broadcast</i>	6
<i>GNSS: Global Navigation Satellite System</i>	5
<i>GPS: Global Positioning System</i>	6
<i>GSM: Global System for Mobile Communications</i>	23
<i>h: pravac leta</i>	15
<i>HF: High frequency</i>	5
<i>HKZP: Hrvatska kontrola zračne plovidbe</i>	2
<i>ICAO: International Civil Aviation Organization</i>	5
<i>IF: intermediate frequency</i>	19
<i>IF: Intermediate Frequency Band</i>	30
<i>LA: Long Range</i>	23
<i>lon: longitude</i>	12
<i>LTE: Long Term Evolution</i>	23
<i>MLAT: Multilateration</i>	2
<i>NL: Number of longitude zones</i>	10
<i>NOTAM: Notice to Airmen</i>	6
<i>NZ: Number of latitude zones</i>	9
<i>PPM: Pulse Position Modulation</i>	7
<i>PRF: Pulse repetition frequency</i>	3
<i>PSR: Primary Surveillance Radar</i>	2
<i>RF: Radio frequency</i>	20
<i>RFID: Radio-frequency identification</i>	23

<i>RP-SMA: Reverse-polarity SMA</i>	24
<i>SAD: Sjedinjene Američke Države</i>	5
<i>SDR: Software-defined radioc</i>	19
<i>SESAR: Single European Sky ATM Reasearch</i>	1
<i>Sew: znak istok- zapad brzine</i>	14
<i>Sns: znak sjever-jug brzine</i>	14
<i>S-NS: znak sjever-jug brzine</i>	14
<i>sps: samples per second</i>	30
<i>SSR: Secondary Surveillance radar</i>	2
<i>S-WE: znak istok- zapad brzine</i>	14
<i>TCAS: Traffic Collision Avoidance System</i>	6
<i>TDOA: Time difference of arrival</i>	4
<i>TIS-B: Traffic Information Service – Broadcast</i>	6
<i>UAT: Universal Access Transceiver</i>	5
<i>UHF: Ultra high frequency</i>	3
<i>UMTS: Universal Mobile Telecommunications System</i>	23
<i>v: horizontalna brzina</i>	15
<i>Vew: istok-zapad brzina</i>	14
<i>VF: visokofrekventni</i>	19
<i>Vns: sjever-jug brzina</i>	14
<i>V-NS: sjever-jug brzina</i>	14
<i>VrSrc: Vertical Rate Source</i>	15
<i>V-WE: istok-zapad brzina</i>	14



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ završnog rada
pod naslovom **Programiranje prijamnika ADS-B definiranog softverom**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 10.09.2018. _____

Student/ica:

Tea Dobroslavić

(potpis)