

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Marko Hrastovec

**Zajem in obdelava meteoroloških
podatkov z letal z radarji Mode-S**

MAGISTRSKO DELO

Mentor: prof. dr. Franc Solina

Ljubljana, 2010

Št.: 131-MAG-RI/2010

Datum: 1. 3. 2010



Marko H R A S T O V E C, univ. dipl. inž. rač. in inf.

L j u b l j a n a

Fakulteta za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani izdaja naslednjo magistrsko nalogo

Naslov naloge: **Zajem in obdelava meteoroloških podatkov z letal z radarji Mode-S**

Processing meteorological data acquired from aircrafts with Mode-S radars

Tematika naloge:

Do pred kratkim je radarska oprema v Sloveniji omogočala le določanje položaja letala. Z radarji nove generacije (Mode-S) in ustrezno opremo na letalu, je možno z letal pridobiti veliko uporabnih informacij. Letalo lahko med letom meri temperaturo, pritisk in celo smer in moč vetra ter vse to v realnem času posreduje radarju. Zgoraj naštetih podatki so pomembne informacije za meteorološko službo pri napovedovanju vremena, ki v ta namen vsak dan spušča v zrak balon z merilnimi instrumenti. Podatki z balona so na voljo le enkrat dnevno, z letal pa bi dobivali pogostejše meritve. Glavni cilj naloge je prvi korak h kakovostnejšim, zanesljivejšim in cenejšim meritvam višinskih atmosferskih podatkov.

V prvem delu naloge izdelajte vmesnik, ki bo z letal pridobil podatke in jih ustrezno shranjeval. Drugi del naj ovrednoti pridobljene podatke in jih primerja z meritvami pridobljenimi z vertikalnih sondaž ozračja. V zadnjem delu naloge pa razvijte metodo za izdelavo meteoroloških poročil narejenih iz letalskih podatkov, ki bo sposobna čim boljše izničiti napake v meritvah in podati kar najboljše rezultate. Splošno uveljavljena in sprejeta metoda za izračunavanje prave vrednosti pridobljene iz meritev, ki so podvržene napakam, je Kalmanov filter, ki ga uporabite za ta namen.

Mentor:

prof. dr. Franc Solina



Dekan:

prof. dr. Franc Solina

Rezultati magistrskega dela so intelektualna lastnina Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavljanje ali izkoriščanje rezultatov magistrskega dela je potrebno pisno soglasje Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

Besedilo je oblikovano z urejevalnikom besedil \LaTeX .

Št.: 131-MAG-RI/2010

Datum: 1. 3. 2010



Marko H R A S T O V E C, univ. dipl. inž. rač. in inf.

L j u b l j a n a

Fakulteta za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani izdaja naslednjo magistrsko nalogo

Naslov naloge: **Zajem in obdelava meteoroloških podatkov z letal z radarji Mode-S**

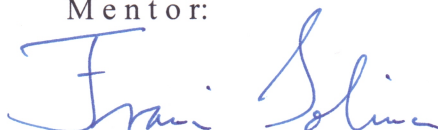
Processing meteorological data acquired from aircrafts with Mode-S radars

Tematika naloge:

Do pred kratkim je radarska oprema v Sloveniji omogočala le določanje položaja letala. Z radarji nove generacije (Mode-S) in ustrezno opremo na letalu, je možno z letal pridobiti veliko uporabnih informacij. Letalo lahko med letom meri temperaturo, pritisk in celo smer in moč vetra ter vse to v realnem času posreduje radarju. Zgoraj naštetih podatki so pomembne informacije za meteorološko službo pri napovedovanju vremena, ki v ta namen vsak dan spušča v zrak balon z merilnimi instrumenti. Podatki z balona so na voljo le enkrat dnevno, z letal pa bi dobivali pogostejše meritve. Glavni cilj naloge je prvi korak h kakovostnejšim, zanesljivejšim in cenejšim meritvam višinskih atmosferskih podatkov.

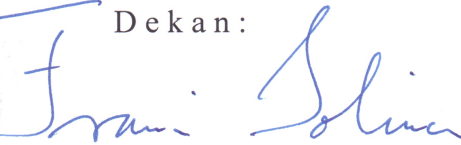
V prvem delu naloge izdelajte vmesnik, ki bo z letal pridobil podatke in jih ustrezno shranjeval. Drugi del naj ovrednoti pridobljene podatke in jih primerja z meritvami pridobljenimi z vertikalnih sondaž ozračja. V zadnjem delu naloge pa razvijte metodo za izdelavo meteoroloških poročil narejenih iz letalskih podatkov, ki bo sposobna čim bolj izničiti napake v meritvah in podati kar najboljše rezultate. Splošno uveljavljena in sprejeta metoda za izračunavanje prave vrednosti pridobljene iz meritev, ki so podvržene napakam, je Kalmanov filter, ki ga uporabite za ta namen.

Mentor:


prof. dr. Franc Solina



Dekan:


prof. dr. Franc Solina

IZJAVA O AVTORSTVU

magistrskega dela

Spodaj podpisani Marko Hrastovec,

z vpisno številko 24011162,

sem avtor magistrskega dela z naslovom:

Zajem in obdelava meteoroloških podatkov z letal z radarji Mode-S

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem magistrsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom prof. dr. Franca Soline
- so elektronska oblika magistrskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko magistrskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike magistrskega dela v zbirki "Dela FRI".

V Ljubljani, dne 2.3.2010

Podpis avtorja:

Zahvala

Rad bi se zahvalil Kontroli zračnega prometa Slovenije, d.o.o., ki mi je omogočila, da sem se lotil zanimive raziskave v okviru svoje magistrske naloge. Strokovnjaki za meteorologijo iz Agencije Republike Slovenije za okolje in prostor so mi s svojim znanjem, nasveti in podatki nudili veliko pomoč, brez katere naloge nikoli ne bi mogel narediti. Rad bi se zahvalil tudi profesorju dr. Francu Solini, ki mi je s svojimi dragocenimi nasveti pomagal, da je to delo dobilo obliko in vsebino, ki je boljše razumljiva in berljiva. Nenazadnje se zahvaljujem svoji družini, ki je zelo dolgo in potrpežljivo prenašala čas, ko sem se posvečal študiju namesto njej. Zamujeni čas bom poskusil sedaj vsaj malo nadoknaditi.

Kazalo

Povzetek	1
Abstract	2
1 Uvod	3
2 Zajem podatkov	8
2.1 AMDAR	8
2.1.1 E-AMDAR	9
2.2 O radarjih	9
2.2.1 Zajem podatkov z radarjev	11
2.2.2 Dekodiranje radarskih sporočil	12
2.3 Tipala in meritve	16
2.4 Testno obdobje	18
2.4.1 Referenčne meritve	19
2.5 Aplikacija za zajem in shranjevanje podatkov	20
2.5.1 Vizualizacija radarskih podatkov	21
2.5.2 Ostali moduli	25
2.5.3 Razvojno okolje in orodja	25
3 Vrednotenje podatkov	27
3.1 Preverjanje pravilnosti radarskih podatkov	27
3.2 Kriteriji za izločanje neustreznih meritev	28
3.3 Primerjava podatkov	28
3.4 Analiza meritev	31
3.4.1 Temperatura	34
3.4.2 Hitrost vetra	40
3.4.3 Smer vetra	46

4	Izdelava meteoroloških poročil	52
4.1	Kalmanov filter	53
4.1.1	Opis Kalmanovega filtra	53
4.1.2	Poenostavitve uporabljenega Kalmanovega filtra	57
4.2	Opis rešitve	58
4.3	Ovrednotenje pridobljenih rezultatov	59
4.3.1	Prilagoditve Kalmanovega filtra	60
5	Zaključek	71
	Seznam slik	73
	Seznam tabel	75
	Literatura	76

Seznam uporabljenih kratic in simbolov

Kratica, simbol	Opis
ACARS	Aircraft Communications Addressing and Reporting System je sistem za prenos kratkih digitalnih sporočil med letali in zemeljsko kontrolo po radij-tempski ali satelitski povezavi.
AMDAR	Aircraft Meteorological Data Relay je mednarodni program za avtomatsko zbiranje vremenskih podatkov s komercialnih letal s prenosom po podatkovnih poteh ACARS.
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
ASDAR	Aircraft to Satellite Data Relay je sistem za prenos digitalnih sporočil med letali in zemeljsko kontrolo po satelitski povezavi.
ASTERIX	A ll Purpose S Tstructured E urocontrol Su Rveillance I nformation E Xchange je standard formata za izmenjavo in prenos radarskih podatkov.
DME	Distance Measuring Equipment je navigacijsko sredstvo na Zemlji, ki omogoča letalom določanje točnega položaja z uporabo radijskih valov.
FL	Flight Level je višina letala v tisočih čevljev pri standardnem pritisku.
GPS	Global Positioning System je satelitski sistem za določanje položaja na Zemlji.
ICAO	International Civil Aviation Organization je mednarodno civilno združenje služb letalskega prometa.

Kratica, simbol	Opis
VOR	VHF Omnidirectional Range je navigacijsko sredstvo na Zemlji, ki omogoča letalom določanje točnega položaja z uporabo radijskih valov.
WGS	World Geodetic System je standard za kartografijo, geodezijo in navigacijo. Predpisuje standardni koordinatni sistem, s katerim določamo točen položaj na Zemlji z zemljepisno dolžino in širino ter nadmorsko višino.
WMO	World Meteorological Organisation je svetovna meteorološka organizacija.

Povzetek

Radarji Mode-S so sposobni z letal pridobiti tudi meteorološke podatke. Trenutno je možno pridobiti temperaturo, moč in smer vetra. V svoji nalogi sem najprej naredil zajem teh podatkov.

Z Agencije Republike Slovenije za okolje in prostor sem dobil kontrolne podatke z radijskih sond. Radijske sonde spuščajo v zrak vsak dan in so dragocen vir informacij o atmosferi v višjih zračnih plasteh. Podatke z letal sem primerjal s podatki iz sond in opravil analizo točnosti in zanesljivosti letalskih podatkov.

V zadnjem delu naloge sem naredil zajem podatkov z letal v realnem času in izdelavo navpičnih profilov ozračja s Kalmanovimi filtri. Razvil sem metodo za avtomatsko izločanje netočnih meritev, da bi bili rezultati karseda zanesljivi. Primerjal sem jih z meteorološkimi napovedmi višinskih vetrov in točnost meritev je bila presenetljivo natančna. Navpični profili ozračja narejeni s podatkov z letal so torej zelo dober približek meritev pridobljenih z radijskih sond. Podatki z letal so bistveno cenejši od spuščanja radijskih sond, a so zaenkrat še pomanjkljivi. Glavni pomanjkljivosti sta zajemanje podatkov o relativni vlažnosti, ker letala senzorjev za to nimajo, in manjkajoči podatki na višinah, kjer letala ne letajo. Vsaj podatke o relativni vlažnosti lahko v prihodnosti pričakujemo, ker na nekatera letala senzorje že poskusno nameščajo.

Obstaja še veliko možnosti uporabe podatkov pridobljenih na ta način. Projekt AMDAR bi lahko prišel do velike količine podatkov pridobljenih po drugi podatkovni poti. Z več informacijami bi lahko letala vnaprej opozarjali na vremenske nepravilnosti. Z Agencijo Republike Slovenije za okolje te možnosti raziskujemo in nameravamo razviti še druge uporabne produkte.

Ključne besede:

radar, letalo, meteorologija, ozračje, Kalmanov filter

Abstract

Processing Meteorological Data Acquired From Aircrafts With Mode-S Radars

Mode-S radars are capable to acquire meteorological data from aircrafts. At present it is possible to get temperature, wind speed and direction. The data are decoded, collected and stored.

The Slovenian Environmental Agency provided control data from radiosondes. Radiosondes measure data daily and are valuable source of information about high atmosphere. Aircraft data were compared to radiosondes data and analyzed for accuracy and reliability.

The last part of paper describes methods for producing vertical atmosphere profile from data fetched from radar in real time with Kalman filter. The method presented automatically excludes measurements which are not accurate enough to get more accurate results. Data produced with this method were surprisingly accurate. Vertical profiles produced from aircraft data proved to be a very good substitute for radiosonde data. They are also much cheaper but they lack some information. Main drawbacks are missing air moisture data because aircrafts don't have sensors for it and missing data on heights where aircrafts don't fly. At least air moisture data can be expected in the near future since some sensors are already mounted on aircrafts for tests.

There are many possible ways of usage of data acquired this way. AMDAR project could get a large amount of additional data via alternate path. With more information about atmosphere aircrafts could be warned about weather inconveniences. We are exploring other ways of using the data with Slovenian Environmental Agency and intend to develop new useful products.

Key words:

radar, airplane, meteorology, atmosphere, Kalman filter

Poglavje 1

Uvod

Točni vremenski podatki na krovu letala so ena bistvenih informacij, ki jih posadka potrebuje, da letalo lahko varno prileti na svoj cilj. Zato na letalih potrebujejo čimbolj natančno vremensko napoved poleg lastne opreme, ki zaznava bistvene vremenske dejavnike.

Za napovedovanje vremena so zelo pomembni podatki, ki jih dobimo iz radijskih sond za merjenje višinskih atmosferskih podatkov. To so oddajniki pritrjeni na helijev balon, ki beležijo atmosferske podatke, ko se balon dviguje, in jih preko radijske zveze pošiljajo v centralo. Sonde merijo položaj, temperaturo, zračni pritisk in relativno vlažnost. Iz položaja sonde razberemo višino in izračunamo še smer ter moč vetra. Iz takih meritev dobimo prerez atmosfere na različnih višinah. Agencija Republike Slovenije za okolje spušča tako sondo enkrat dnevno.

Po drugi svetovni vojni so letalom pripenjali na krila meteorološke senzorje, ki so na valj zapisovali izmerjene vrednosti. Pilotom so plačevali, da so leteli čim višje in prinesli nazaj dragocene meteorološke podatke. Ker so bili piloti nagrajevani za velike višine, so marsikdaj izgubili zavest zaradi pomanjkanja kisika in v tem času je bilo zabeleženo precejšnje število nesreč. Piloti še vedno javljajo podatke o vremenskih nepravilnostih, ki bi utegnile motiti tudi druga letala, kontrolam zračnega prometa ali svojim družbam. Žal pa ti podatki običajno ne prispejejo do meteoroloških služb.

Leta 1924 je William Blaire iz ZDA izvedel prve poskuse meritev atmosfere z baloni. Prvo pravo radijsko sondo, ki je pošiljala meteorološke podatke je francoski znanstvenik Robert Bureau izpustil v ozračje sedmega januarja 1929. Poimenoval jo je "radiosonde". Neodvisno od tega je leto kasneje dne, 30.1.1930, Pavel Molčanov izpustil v zrak svojo sondo. Njegova izvedba je postala splošno sprejeta, ker je bila preprosta in ker je odčitke pošiljala po

radijski zvezi v Morsejevi abecedi. To je omogočalo uporabo brez posebnih znanj ali šolanja. Sergej Vernov je leta 1935 izboljšal Molčanovo sondo tako, da je dodal tudi zaznavanje kozmičnih žarkov na velikih višinah. Njegova sonda je merila podatke do višine 13,6km (Wikipedia, [1]).

S tem so bili postavljeni temelji današnjim meteorološkim sondiranjem, ki so kljub mnogim satelitskim slikam še vedno dragocen vir informacij za vremenske napovedi. Podatki o atmosferi v višjih zračnih plasteh so koristni za vremenske napovedi. Za letalstvo pa so najpomembnejši podatki o vetrovih na posameznih višinah.

Znan je primer letala, ki je letelo preko Atlantika v Severno Ameriko. Zaradi izredno močnega nasprotnega vetra je letalu pričelo primanjkovati goriva. Pilot se je obrnil na kontrolo zračnega prometa in zaprosil za pomoč. Ker je imela kontrola podatke o višinskih vetrovih, so ga lahko preusmerili na drugo višino, kjer je bil nasprotni veter toliko manjši, da nevarnosti za to, da bi letalo potrošilo gorivo, ni bilo več. To je skrajni primer, kjer je prava informacija o višinskih vetrovih življenjskega pomena. Običajno programska oprema kontrole zračnega prometa uporablja višinske vetrove za izračunavanje časov preletov letal, ker veter precej vpliva na hitrost letenja.

Letalske družbe že nekaj časa aktivno uporabljajo vremenske napovedi višinskih vetrov za načrtovanje letov. Z zračno potjo v bolj ugodnih vetrovih prihranek goriva predstavlja bistveno zmanjšan strošek celotnega potovanja. Za višje plasti ozračja, kjer so vetrovi veliko bolj stalni, so te napovedi zelo točne in letala se lahko zanesejo na to, da bodo letela tako, da bo zanje najbolj ugodno.

Ob morebitni napačni napovedi in neugodnih razmerah letenja žal ni preprosto izvedljivo, da bi letala med letom menjala višino leta in tako iskala najcenejšo pot. Pred letom mora pilot oziroma letalska družba oddati načrt leta, ki se razpošlje v vse kontrole zračnega prometa, ki jih namerava preleteti. Na podlagi teh načrtov letov se načrtuje zasedenost zračnega prostora, čase vzletov, izmene kontrolorjev zračnega prometa in njihovo optimalno obremenjenost ter še druge stvari. Če letalo torej preusmerimo na višino, kjer ni načrtovalo leta, to za kontrolorja ne predstavlja velikega problema. Lahko pa se zgodi, da bo zaradi tega v sosednji kontroli letalo priletelo v sektor, ki je že preobremenjen in ga bo tam spet potrebno preusmeriti. Nenazadnje pa ni vseč ne pilotom in ne potnikom, da se letalo kar naprej dviga in spušča. Bolj zaželeno, da se leti na potovalni višini čim dlje. Seveda se ob izrednih razmerah vedno ukrepa tako, da je za letalo in potnike najbolj varno, kot je to bilo v prej omenjenem primeru letala nad Atlantikom.

Letala so sposobna zajemati vremenske podatke s svojimi senzorji med

letom. Senzorji za temperaturo in zračni pritisk so obvezna oprema vsakega letala. Nekatera letala imajo tudi opremo, ki je sposobna pridobiti še koristne druge podatke kot na primer smer in moč vetra. Zajemanje teh podatkov in njihova obdelava daje veliko informacij o atmosferi in so zelo podobni meritvam opravljenimi s sondami.

V svetu že potekajo projekti, ki preko podatkovnih povezav pridobivajo atmosferske podatke z letal. Podatke sporočajo samo letala nekaterih družb po radijski povezavi. Programska oprema na letalu vseskozi spremlja vremenske razmere. Iz pridobljenih meritev izračuna povprečno vrednost in jo po kot podatkovni paket pošlje po radijski povezavi. Frekvenca pošiljanja podatkov je različna glede na to, kje in kako letalo leti. Na velikih višinah, kjer letalo leti naravnost in se razmere ne spreminjajo veliko pošlje podatke le na pet minut. Ob pristajanju in vzletanju, ko letalo leti skozi več zračnih plasti in so razmere bolj spremenljive, pa glede na fazo leta pošilja podatke na štiri do dvajset sekund. Vse to zbira računski center projekta AMDAR. AMDAR je projekt svetovne meteorološke organizacije WMO, ki podatke pridobiva, hrani in nudi uporabnikom. Pridobljeni podatki so na voljo v realnem času za državne ustanove za potrebe napovedovanja vremena. Na voljo so tudi raziskovalcem za raziskovalne namene, letalskim družbam, ki prispevajo podatke in drugim v nekomercialne namene.

V svoji magistrski nalogi sem se lotil zajema istih podatkov preko druge podatkovne poti. To je zajem podatkov z radarji, ki se uporabljajo za kontrolo zračnega prometa. Radarji Mode-S lahko so sposobni zajemati meteorološke podatke s tistih letal, ki imajo ustrezne senzorje za merjenje. V svetu je vedno več takih radarjev in letal in s tem se ponuja možnost, da na drug način pridemo do istih podatkov. Projekt AMDAR bi lahko tako še po drugi poti dobil velike količine dodatnih podatkov. To bi zagotavljalo več kakovostnejših informacij o ozračju.

Z radarjem Mode-S, ki je postavljen na letališču Jožeta Pučnika, sprejemamo tudi meteorološke podatke z letal. V prvem delu naloge sem naredil najprej sprejem podatkov z radarja, dekodiranje in shranjevanje v relacijsko podatkovno bazo. To je bila osnova za nadaljnje korake, ki so obsegali analizo, ovrednotenje in obdelavo podatkov.

Od Agencije Republike Slovenije za okolje - ARSO sem dobil primerljive podatke z njihovih radijskih sond. Podatke pridobljene z radarja sem lahko primerjal z njihovimi meritvami. Ovrednotil sem točnost in zanesljivost podatkov pridobljenih z letal preko radarja.

Glavni cilj naloge je, da bi lahko uporabili podatke pridobljene z letal uporabili v različne namene. Možnosti uporabe so neomejene. Naj jih naštejemo samo

nekaj.

Prvi primer uporabe je izdelava navpičnega profila ozračja, ki ga Agencija Republike Slovenije izdaja kot napoved za letalstvo. Izdelal sem metodo, ki samo iz letalskih podatkov naredi tabelo, ki je primerljiva z meteorološko napovedjo. To je zelo dobra zamenjava za primer, ko letalske napovedi višinskih vetrov in temperatur ne bi prejeli. Trenutno morajo ob izpadu napovedi kontrolorji zračnega prometa sami na roke vpisovati podatke o vetrovih na posameznih višinah. Dobijo pa jih le od pilotov, če jih le ti posredujejo. To je zamuden proces, ki žal dopušča veliko napak. Nova metoda bo lahko sama ažurirala podatke v tabeli z najnovejšimi meritvami. Ker je postopek uvedbe novosti v kontroli zračnega prometa podvržen strogim kriterijem varnosti v zračnem prometu, bo še nekaj časa trajalo, da se bo ta metoda uporabljala v operativne namene. Začetek je narejen in optimistično zrem v prihodnost, ko bomo imeli koristi od tega.

Drugi primer uporabe je simulacija spuščanja radijske sonde. Že samo eno letalo, ki se spušča na letališče, ali pa vzleta z njega je zelo dober približek radijske sonde, saj pridobi meteorološke podatke na vseh višinah. Radar se zasuče okoli svoje osi vsake štiri sekunde, torej imamo novo meritev vsake štiri sekunde. Če pa upoštevamo, da je v zraku naenkrat več letal, se količina meritev precej poveča. Meritve niso tako natančne kot pri radijski sondi in tudi na nekaterih višinah, kjer ni letal, podatki manjkajo. Kljub temu so meritve zelo dragocene, ker so bistveno cenejše in ker jih lahko dobivamo ves čas, ko so letala v zraku. Sonda pa se spušča le enkrat ali dvakrat dnevno. Ob vremenski spremembi podatkov s sonde ni, dokler se ne spusti nova, z letal pa bi tako spremembo hitro zaznali.

Podatke pridobljene preko radarja bi lahko uporabili za projekt AMDAR. Podobno, kot letalska programska oprema zbira podatke in jih posreduje računskemu centru AMDAR, bi lahko te podatke zbirali s programsko opremo na tleh. Kreirali bi identična sporočila, kot jih oddajajo letala in jih posredovali računskemu centru projekta AMDAR. Sporočila bi torej bila enaka, le prenosna pot bi bila druga. Tako dosežemo, da je sprememba na strani projekta AMDAR minimalna ob tem, da bi lahko prejeli veliko več kakovostnih podatkov.

Vsi naštetih primeri uporabe zahtevajo metode za zajem meritev, ki sem jih razvil v tej nalogi. Na podlagi ovrednotenja podatkov sem pripravil metodo izločanja manj zanesljivih meritev in združevanje več meritev v eno vrednost z uporabo Kalmanovega filtra. Združevanje meritev je lahko poljubno. Za potrebe izdelave navpičnega profila ozračja se združujejo meritve več letal na isti višini in vse prispevajo h končni čimbolj natančni vrednosti izmerjeni na

določeni višini. Za potrebe simulacije radijske sonde se meritve združujejo glede na izmerjen pritisk in podobno meritve izmerjene pri istem pritisku prispevajo h končni vrednosti. Za projekt AMDAR pa se lahko beležijo meritve vsakega letala posebej in se kreirajo poročila ob določenih časovnih intervalih.

Možnosti uporabe pridobljenih podatkov je veliko. Nenazadnje se lahko nadejamo, da bomo s pomočjo teh dodatnih virov podatkov v prihodnosti imeli natančnejše in zanesljivejše vremenske napovedi za vse uporabnike in ne samo za letalstvo.

Poglavje 2

Zajem podatkov

Prvi del naloge je namenjen zajemu podatkov z radarja. Radar podatke pridobljene z letala obdela in jih pošlje po omrežju. Eden od sistemov v računskem središču kontrole zračnega prometa te podatke sprejema in jih distribuira naprej drugim uporabnikom po standardnih omrežnih povezavah preko TCP/IP omrežja. Moja prva naloga je torej bila napisati program, ki bo "poslušal" te podatke na mreži, jih dekodiral in shranjeval.

2.1 AMDAR

AMDAR je kratica za Aircraft Meteorological Data Relay. Projekt se je začel v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja kot First Global Atmospheric Research Programme (GARP) Global Experiment (FGGE). Projekt je namenjen avtomatskemu javljanju meteoroloških podatkov z letal. S temi podatki si vremenske organizacije pomagajo pri izdelovanju vremenskih napovedi.

Po navedbah organizacije AMDAR (WMO, [12]) je strošek zajema podatkov in izdelave profila temperature in vetra letala v vzpenjanju ali spuščanju le 1% cene radijske sonde. Iz Agencije Republike Slovenije za okolje sem dobil informacijo, da ena sonda stane približno 100EUR. Podatke pridobljene na cenejši način se vsekakor splača uporabiti. Prav tega sem se lotil v svoji nalogi.

Prvi začetki avtomatskih meteoroloških poročil z letal segajo v sedemdeseta leta dvajsetega stoletja. Takrat je bil predlagan AMDAR kot projekt za First Global Atmospheric Research Programme (WMO AMDAR, [2]).

Za komunikacijo so razvili dve metodi za prenos meteoroloških podatkov preko vremenskih satelitov in tretjo, ki uporablja standardni VHF komunikacijski sistem za prenos podatkov (ACARS). Široko sprejeta je postala zadnja rešitev in se uporablja še danes. Kasneje so razvili še sistem za satelitski prenos

podatkov (ASDAR) in ga predali v uporabo leta 1991. Tudi ta se ne razvija več, čeprav je verjetno še vedno nekaj letal, ki ga uporabljajo.

Podatki se zbirajo in obdelujejo v meteoroloških centrih. Redno se preverja kakovost podatkov in opozarja ali izloča iz meritev letala, ki nimajo pravilno umerjenih instrumentov.

Podatki so na voljo meteorološkim službam, ki jih uporabljajo za svoje računske modele za napovedovanje vremena.

2.1.1 E-AMDAR

E-AMDAR je evropski del projekta AMDAR. Poročajo, da zbirajo podatke z malo manj kot 400 letal, ki jih pošiljajo po satelitski povezavi in dnevno prejmejo okoli 32.000 odčitkov. Skoraj toliko odčitkov dnevno sem dobil samo z enega radarja v povprečju v poletnem času. Menim, da bi bila korist zbiranja podatkov preko radarjev očitna prednost, ker bi bila količina podatkov lahko bistveno večja, če bi se seveda v zbiranje vključilo več držav skupaj s svojimi radarji.

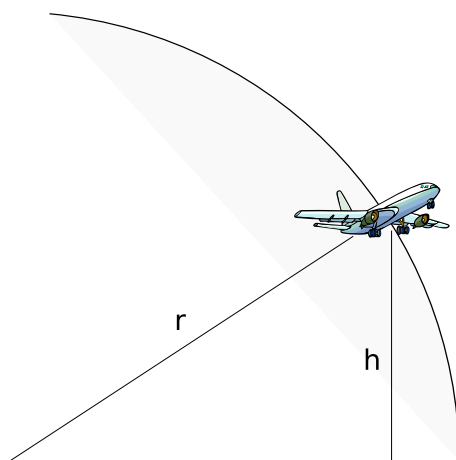
Samo v Evropi je postavljenih že preko 200 radarjev Mode-S in lahko si mislimo, kakšne koristi bi lahko imeli, če bi jih vsaj nekaj posredovalo vremenske podatke ustreznim službam. Trenutno se ta prenosna pot še ne uporablja, menim pa, da bi se lahko in bi prinesla mnoge koristi.

2.2 O radarjih

Radarji so eno najpomembnejših orodij za vodenje kontrole zračnega prometa. Trenutno so v večini sveta še vedno edini vir informacij o položaju letal v zračnem prostoru.

V grobem ločimo dve vrsti radarjev za letalske namene. Prva vrsta so primarni radarji, kot si jih predstavlja večina ljudi. Ti beležijo odboje radarskih signalov z letal brez sodelovanja letala. Žal pa s temi radarji ne moremo določiti natančnega položaja letala v zraku. Za natančno določitev potrebujemo še podatek o višini letala. Za ta namen uporabljamo tako imenovane sekundarne radarje. Sekundarni radar odda signal, na katerega odgovori naprava v letalu, ki jo imenujemo transponder. Najpomembnejša podatka, ki ju vračajo vsa letala v civilnem zračnem prometu sta odgovor Mode-A in Mode-C na poizvedbo radarja. Mode-A odgovor je podatek o višini, Mode-C pa odgovor o štirištevilčni oktalni kodi, ki jo je nastavil pilot po navodilih kontrolorja zračnega prometa.

Podatek Mode-C enolično določa letalo v zračnem prostoru in brez njega ne bi mogli ločiti letal med seboj. Brez podatka Mode-A pa ne bi mogli točno določiti položaja letala, saj se le to lahko nahaja kjerkoli na krožnici ali delu krogle z radarjem v središču. Radar lahko ugotovi smer, v katero je obrnjen, ko je zaznal letalo in oddaljenost letala. Ne more pa vedeti, na kateri višini se letalo nahaja brez Mode-A vrednosti. Na sliki 2.1 vidimo krožnico s polmerom r , na kateri bi se letalo lahko nahajalo, če ne bi imeli podatka o njegovi višini h . Ker pa podatek o višini prejmemo s sporočilom Mode-A, je položaj letala enolično določen.



Slika 2.1: Položaja letala ne moremo enolično določiti brez višine (h)

Vidimo, da so sekundarni radarji bistvenega pomena, a še vedno ohranjamo tudi primarne, ker tudi ob morebitni okvari opreme na letalu vračajo približen položaj letala neodvisno od letala.

Radarji Mode-S so najnovejša generacija sekundarnih radarjev. Skupaj z ustrežno opremo na letalu (transponder Mode-S) so sposobni od letala pridobiti veliko več podatkov kot le višino in identifikacijo.

Način delovanja Mode-S med drugimi standardnimi podatki lahko od letala pridobi tudi vsebino 56 bitnih registrov, ki vsebujejo različne informacije. Radar ima nastavljen določen nabor registrov, ki jih zahteva od letala. Celoten seznam registrov je zelo velik in je naveden v ICAO dokumentu Aeronautical Communications Annex 10 Volume III (ICAO, 1995, [4]). Nekaj teh registrov je namenjenih vremenskim podatkom, ki jih senzorji na letalu zaznavajo in merijo. Radar Mode S postavljen na letališču Jožeta Pučnika (v nadaljevanju radar Charlie) iz množice možnih registrov trenutno zajema naslednje:

- BDS 4,0 - Selected vertical intention

- BDS 4,4 - Meteorological routine air report
- BDS 4,5 - Meteorological hazard report
- BDS 5,0 - Track and turn report
- BDS 6,0 - Heading and speed report.

Register, ki vsebuje najpomembnejše podatke o atmosferi je BDS 4,4 - Meteorological routine air report. Ta register vsebuje:

- hitrost vetra (wind speed),
- smer vetra (wind direction),
- temperaturo zraka (static air temperature),
- turbulenco (turbulence),
- relativno vlažnost (humidity).

Trenutno manj kot 10% letal vrača podatke o vetru in temperaturi. Žal letala nimajo senzorjev za relativno vlažnost in podatka o vlažnosti ne vračajo. Kljub temu je količina zajetih podatkov velika in je možno iz njih izluščiti potrebne informacije.

Projekt E-AMDAR je kupil nekaj poskusnih senzorjev zračne vlažnosti, ki so jih namestili na letala. Zdaj dobivajo podatke z njih in ocenjujejo zanesljivost in natančnost teh senzorjev. Ko so taki senzorji operativni, se običajno priklopijo na skupno vodilo in takrat bi tudi z radarjem lahko dobili podatke o relativni vlažnosti.

Podatki prejeti preko radarja so isti kot podatki posredovani preko ACARS in ADS-B povezav v projektu AMDAR. Druge so le prenosne poti in količina prejetih podatkov z enega letala v času leta. Radar ob vsakem obratu pridobi od letala podatke v projektu AMDAR pa se le ti pošiljajo v različnih časovnih intervalih glede na fazo leta in so nastavljivi iz letala. Med pristajanjem se pošiljajo podatki na 20 sekund, med vzletom na 4 sekunde prvo minuto, na 20 sekund naslednji dve minuti in v ostalih primerih na 5 minut.

2.2.1 Zajem podatkov z radarjev

Obračalni čas radarja Charlie je 4 sekunde. V tem času lahko "vidi" nekaj deset letal. Ko radar sproži signal, na katerega transponder odgovori, mora prejeti

odgovor le z enega od njih. Če odgovore pošlje več transponderjev hkrati, odgovorov med seboj ne more ločiti in podatke je potrebno zavreči. Odgovor mora tudi priti v dovolj kratkem času, da se usmerjena antena v tem času ne obrne stran, kar ji onemogoči sprejem celotnega sporočila.

Iz zgoraj navedenega je jasno, da je količina podatkov, ki jo lahko dobimo zelo omejena in zaradi tega optimizirana za minimalno obremenitev prenosne poti. Radar Charlie ob trenutnem prometu in hitrosti vrtenja lahko zajame največ pet BDS registrov z enega letala. To pomeni, da v času, ko je antena obrnjena proti letalu vsaj petkrat pošlje signal in čaka na odgovor. Vsakič zahteva vsebino drugega registra in na koncu ima podatke petih registrov, ki jih vrne letalo in njegovo identifikacijo, višino, azimut ter oddaljenost. Programska oprema radarja signale obdela in skreira sporočilo, ki se uporablja za pošiljanje po prenosnih poteh do kontrole zračnega prometa. Sporočilo je v formatu ASTERIX (Eurocontrol, [10]). ASTERIX standard za prenos radarskih podatkov je bil razvit v Eurocontrolu in je prilagojen za prenos po prenosnih poteh z majhno pasovno širino. Za radarje Mode-S se uporablja kategorija 48 standarda (CAT048). Eno sporočilo vsebuje podatke o enem letalu, ki jih je bil radar sposoben zajeti v enem obratu. V naslednjem obratu bo prispelo naslednje sporočilo o istem letalu, če je le to še v vidnem obsegu. Takemu podatku pravimo točka (angleško plot). Ko več točk združimo v trajektorijo leta letala temu pravimo sled letala (angleško track).

2.2.2 Dekodiranje radarskih sporočil

ASTERIX

Format ASTERIX je postal splošno sprejet standard za prenos radarskih podatkov preko podatkovnih linij. Zasnovan je bil v času, ko so bile pasovne širine veliko manjše kot sedaj in tudi računske sposobnosti računalnikov so bile veliko nižje. Zato so podatki zapisani tako, da jih lahko tudi šibkejši računalniki lahko obdelujejo v realnem času. To pomeni, da kljub zahtevam po majhni pasovni širini, osnovne podatkovne enote niso stisnjene ali kako drugače optimizirane za skrajšanje dolžine. Radarji se običajno nahajajo na vzpetinah, kjer ni najboljših pogojev za širokopasovne povezave. Glavna značilnost tega formata je torej kompaktnost, ki zagotavlja, da bodo vsi podatki prispeli pravočasno do naslovnika tudi po šibkih prenosnih poteh.

Druga značilnost formata ASTERIX so kategorije. Prvi bajt v sporočilu pove, katera kategorija je vsebovana v sporočilu. Različne kategorije so namenjene različnim potrebam. Običajni primarni in sekundarni radar na primer oddaja podatke v kategoriji 1 (CAT001). Podatki o padavinah, ki so jih pri-

marni radarji sposobni zajeti s pomočjo odbojev signalov od dežnih kapljic so na primer v kategoriji CAT008. Obstajajo tudi kategorije, ki jih pošiljajo programi, ki točke z več radarjev združijo v eno radarsko sliko. Taka je na primer kategorija CAT062. S temi kategorijami je doseženo, da format vsebuje le tista polja, ki se za določen tip podatkov zares potrebujejo. Radar Charlie pošilja podatke v formatu CAT048, ki je naslednik formata CAT001.

Format predvideva, takoj za podatkom o kategoriji bitno masko, ki določa katera od predvidenih polj so sploh vsebovana v sporočilu. Če določenega podatka ni, ga nima smisla pošiljati in zasedati pasovno širino. Tako je doseženo, da se zares pošiljajo le pravi podatki in ne biti brez informacij.

To je bil le zelo splošen opis standarda ASTERIX. Podrobnosti so izven konteksta tega besedila. Točne informacije o formatu so na voljo na spletnih straneh organizacije Eurocontrol, ki razvija in vzdržuje standard (Eurocontrol, [10]).

Podatki o letalu zajeti z radarja

Vsebina vsakega prejetega sporočila je odvisna od konfiguracije letala in podatkov, ki jih vrne preko transponderja. Standard ASTERIX optimizira dolžino sporočil tako, da se manjkajoči podatki ne pošiljajo oz. namesto njih v sporočilu ni prazne vrednosti na njihovem mestu. Če ima letalo transponder Mode-S, se pošlje tudi vsebina BDS registrov.

Radar Charlie sporoča položaje zaznanih letal v svojem lokalnem koordinatnem sistemu v polarnih in kartezičnih koordinatah, kjer se v središču koordinatnega sistema nahaja radar. Osi x in y sta tangenti na zemeljsko površje. Os x je obrnjena proti vzhodu, os y proti severu, os z pa je pravokotna na Zemljino površje. V polarnih koordinatah je položaj letala označen kot trojica koordinat (ρ, Θ, H) , kjer ρ predstavlja oddaljenost letala od radarja, Θ označuje kot pri katerem je radar zaznal letalo (azimut) in H je višina letala, ki jo je letalo sporočilo.

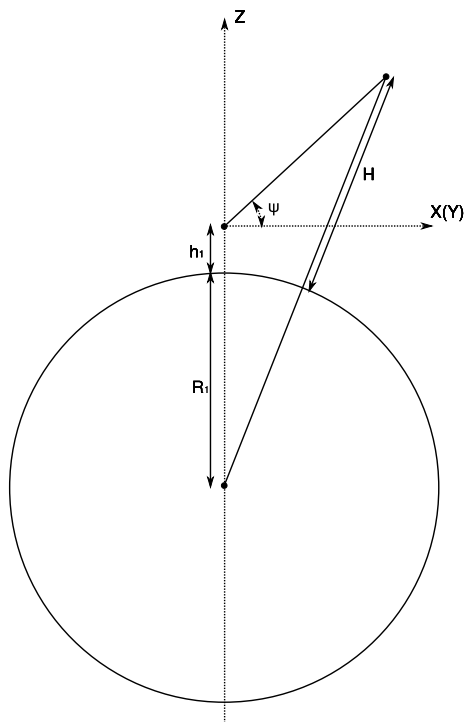
Iz polarnih koordinat lahko izračunamo kartezične koordinate položaja letala, kjer je os y obrnjena proti severu, os x proti vzhodu in os z navpično navzgor.

$$x = \rho \cos \psi \sin \Theta \quad (2.1)$$

$$y = \rho \cos \psi \cos \Theta \quad (2.2)$$

$$z = \rho \sin \psi \quad (2.3)$$

ψ v enačbi predstavlja kot med x in y osjo radarja in letalom z upoštevanjem nadmorske višine radarja in Zemljinega polmera, kjer se nahaja radar.



Slika 2.2: Razmerje med višino in kotom ψ

Radij Zemlje se spreminja glede na zemljepisno širino. Enačba 2.4 predstavlja polmer oziroma oddaljenost od središča Zemlje na nadmorski višini $0m$ s približkom ki predpostavlja, da ima Zemlja obliko elipsoida.

$$R = \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 L)^3}} \quad (2.4)$$

Kjer so

- a = radij ob ekvatorju ($6378137.000m$)
- e = ekscentričnost (0.0818191908426)
- L = zemljepisna širina radarja

$\sin \psi$, ki ga potrebujemo za pretvorbe v kartezične koordinate, je po sliki 2.2 predstavljen takole:

$$\sin \psi = \frac{2R_1(H - h_1) + H^2 - h_1^2 - \rho^2}{2\rho(R_1 + h_1)} \quad (2.5)$$

Iz teh koordinat in višine letala izračunamo položaj letala nad Zemljinim površjem. Pretvorba poteka v dveh korakih.

Najprej iz radarjevega lokalnega koordinatnega sistema (polarnega ali kar-tezičnega) položaj pretvorimo v geocentrični koordinatni sistem. Geocentrični koordinatni sistem ima izhodišče v središču Zemlje. Osi x in y sta na ekvatorju in sekata Zemljino površje na zemljepisnih dolžinah 0° in 90° vzhodno. Os z je usmerjena proti severnemu tečaju.

Slika 2.3 prikazuje razmerje med lokalnim koordinatnim sistemom radarja (X_1, Y_1, Z_1) in geocentričnim koordinatnim sistemom (X_G, Y_G, Z_G) . Pretvorba se izračuna po naslednji enačbi:

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = S_1^T \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + T_1 \quad (2.6)$$

S_1 iz enačbe 2.6 je

$$S_1 = \begin{bmatrix} -\sin G_1 & \cos G_1 & 0 \\ -\sin L_1 \cos G_1 & -\sin L_1 \sin G_1 & \cos L_1 \\ \cos L_1 \cos G_1 & \cos L_1 \sin G_1 & \sin L_1 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

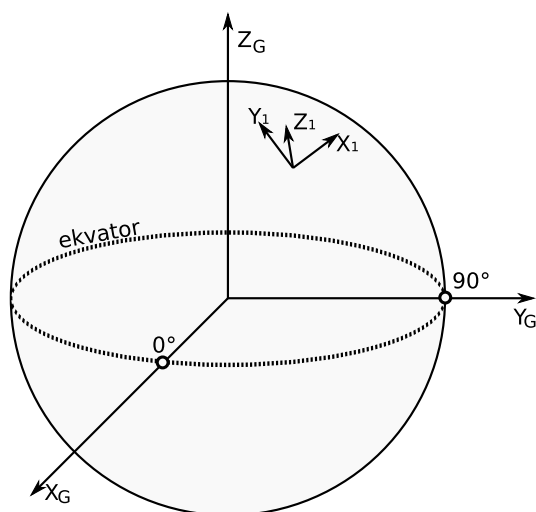
T_1 pa je predstavljen z vektorjem

$$T_1 = \begin{bmatrix} (\eta_1 + h_1) \cos L_1 \cos G_1 \\ (\eta_1 + h_1) \cos L_1 \sin G_1 \\ (\eta_1(1 - e^2) + h_1) \sin L_1 \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Spremenljivke iz matrike predstavljajo

$$\begin{aligned} L_1 &= \text{zemljepisna širina radarja} \\ G_1 &= \text{zemljepisna dolžina radarja} \\ \eta_1 &= \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 L_1}} \end{aligned}$$

V drugem koraku pretvorimo koordinate iz geocentričnega sistema v nam bolj poznani sistem zemljepisne širine in dolžine (Geodesic Co-ordinate System) po standardu World Geodetic System (WGS 84). Z zadnjo pretvorbo dobimo zemljepisno širino (L) in dolžino (G). Zemljepisno dolžino je lahko izračunati za širino pa je izračun bolj zapleten, ker upošteva elipsoidno obliko



Slika 2.3: Razmerje med lokalnim in geocentričnim koordinatnim sistemom

Zemlje. Podrobnosti celotnega izračuna so na voljo v Eurocontrolovi dokumentaciji (Eurocontrol, [7]).

$$\tan L = \frac{1 + H/\eta}{(1 - e^2) + H/\eta} \frac{Z_G}{\sqrt{X_G^2 + Y_G^2}} \quad (2.9)$$

$$\tan G = \frac{Y_G}{X_G} \quad (2.10)$$

Za prikaz meritev in primerjave z drugimi meritvami sem v uporabljal WGS 84 koordinate. Za nekatere analize in določanje oddaljenosti posameznih meritev od radarja, pa je uporaben lokalni koordinatni sistem radarja. S preprosto omejitvijo polarne koordinate ρ na primer zajamemo le meritve v določeni bližini.

2.3 Tipala in meritve

Osnovne meteorološke meritve na krovih letal se izvajajo z naslednjo opremo:

- Pitotjevo cevjo za merjenje statičnega in polnega zračnega pritiska,
- termometrom za merjenje temperature,

- inercialnimi tipali za merjenje vseh vrst pospeškov letala (vzdolžni, prečni in navpični).

Ostale meritve lahko vsebujejo:

- relativno vlažnost izmerjeno na nekaterih letalih,
- senzor za zaznavanje nagiba (naprej-nazaj), ki se uporablja za popravek statičnega pritiska in
- senzorje za zaznavanje ledu na letalnih površinah.

Tipični sistem za javljanje podatkov je sestavljen iz računalnika na krovu in inercialskega referenčnega sistema. Sedaj so letala v glavnem opremljena tudi z navigacijskim GPS sistemom. Sistem GPS omogoča bolj natančne meritve vetra kot inercialski sistem.

Računalnik na krovu letala običajno nudi:

- pritisk izračunano iz statičnega zračnega pritiska;
- statično temperaturo zraka izračunano iz izmerjene temperature in hitrosti (Mach number), kjer je hitrost izračunana iz statičnega in polnega zračnega pritiska.

Inercialski referenčni sistem in drugi navigacijski sistemi pa znajo razbrati še

- zemljepisno dolžino in širino,
- hitrost vetra dobljeno iz izračunanih vektorjev vetra z uporabo zračne hitrosti in popravljeno glede na hitrost (Mach number) in temperaturo,
- smer vetra iz izračunanih vektorjev vetra,
- normalni ali vertikalni pospešek in
- nagib letala.

Nekatera letala lahko javljajo tudi podatek o relativni vlažnosti in turbulencah. To zahteva dodatno procesiranje in zelo redka letala imajo te informacije.

Več podatkov o načinih merjenja je na voljo v AMDAR Reference Manual (WMO, 2003, [11]).

Skupek podatkov, ki ga naj bi jih letalo sporočilo po podatkovni liniji se sestoji iz podatkov o:

- zemljepisni širini,
- zemljepisni dolžini,
- času,
- višini standardnega pritiska,
- temperaturi,
- smeri vetra,
- hitrosti vetra,
- turbulenci,
- relativni vlažnosti,
- zaledenitvah (icing),
- fazi leta (vzpenjanje, spuščanje, let na potovalni višini),
- nagiba letala in
- identifikaciji letala.

Frekvenca javljanja podatkov je odvisna od faze leta. Med vzpenjanjem in spuščanjem je frekvenca višja kot med letom na potovalni višini, kjer so običajno veliko stabilnejši pogoji in zato ni potrebe po pogostem javljanju.

2.4 Testno obdobje

V obdobju 1.6.2009 do 31.8.2009 so se beležili in shranjevali vsi podatki z radarja. Za ta čas so na voljo tudi podrobne meritve, ki jih je izvajala ARSO. Kot prvi del naloge sem naredil program, ki dekodira prejeta sporočila z radarja in jih shranjuje v podatkovno bazo. Program je neke vrste strežnik, ki sprejema sporočila ASTERIX CAT048 preko omrežja, jih dekodira, iz njih razbere podatke in jih zapiše v relacijsko podatkovno bazo.

V enem dnevu prispe z radarja v poletnem času približno 400.000. Od teh jih ima manj kot 10% atmosferske podatke, ki so predmet obravnave. Še vedno je takih odčitkov v povprečju preko 20.000 dnevno.

Program kljub vsemu beleži vsa sporočila, ker so se shranjeni podatki izkazali za zelo uporabne tudi za druge analize delovanja radarja.

2.4.1 Referenčne meritve

ARSO enkrat dnevno izpusti v zrak sondo za merjenje višjih plasti atmosfere in sicer ob 03:00 UTC. Dežurni prognostik, ki je v nočni izmeni, jo izpusti kar z dvorišča Agencije Republike Agencije za okolje za Bežigradom. Sonda med dvigovanjem vetrovi lahko zanesejo zelo daleč in ni redkost, da se prenos prekine, ko je sonda že nad Hrvaško. Meritve, ki jih prejemo preko radarja, so veliko bolj pogoste in so porazdeljene skoraj preko vsega dneva. Ponoči je gostota prometa veliko manjša in takrat je meritev bistveno manj. Ker ponoči letala v glavnem letijo čez naš zračni prostor na velikih višinah tudi nimamo veliko meritev nižjih zračnih plasti. Najboljši podatki za naše potrebe so se izkazali leti, ki pristajajo ali vzletajo na ljubljanskem letališču. Če je letalo ustrezno opremljeno, dobimo prerez za celoten presek višin od tal do višine, kjer je letalo še v vidnem polju radarja. Že samo meritve enega takega letala so precej dober približek sonde.

Podatki, ki jih dobimo od sonde so:

- položaj (zemljepisna širina in višina, nadmorska višina),
- temperatura,
- zračni pritisk,
- smer vetra,
- moč vetra in
- relativna vlažnost.

Od letal je radar sposoben pridobiti podobne podatke, kot jih meri tudi sonda, ker so predvideni kot podatek v sporočilih CAT048. Seveda morajo imeti letala ustrezne senzorje in morajo te vrednosti vračati preko transponderja. V tabeli 2.1 je prikazano število posameznih odčitkov radarja v testnem obdobju treh mesecev.

V vsem testnem obdobju ni bilo niti ene meritve, ki bi vsebovala tudi podatek o relativni vlažnosti. Letala namreč senzorjev za relativno vlažnost žal nimajo. V projektu AMDAR je zelo majhno število letal poskusno opremljenih s senzorji za vlažnost, a očitno ta letala niso letela v dosegu našega radarja, ali pa podatka o relativni vlažnosti ne posredujejo preko transponderja. Če jih bodo kdaj v prihodnosti imela, je za to že predvideno polje v radarskih podatkih in bo možno dobivati tudi te meritve. Za sedaj se moramo zadovoljiti z meritvami brez tega podatka.

	število meritev	odstotek vseh meritev
vsi odčitki	35.453.661	100,00%
položaj letala	33.244.513	93,77%
temperatura	2.645.642	7,46%
zračni pritisk	515.357	1,45%
smer in moč vetra	2.138.386	6,03%
relativna vlažnost	0	0,00%

Tabela 2.1: Količina meritev v testnem obdobju

Letala tudi lahko vračajo opozorila o vremenskih nepravilnostih. Opozorila, ki jih lahko javljajo so:

- turbulence - nestabilni deli atmosfere,
- microburst - lokalne majhne stolpe zraka, ki se gibljejo navzdol (z nizkim pritiskom),
- windshear - spremembe vetrov,
- icing - dele ozračja pod temperaturo ledišča in vlažnostjo, ki povzročajo nabiranje ledu na letalih,
- wakevortex - nestabilnosti in vetrovi, ki jih povzročajo letala med letom.

V času testnega obdobja smo dobili zelo malo teh meritev, ki jih lahko označimo kot napako v sprejemu podatkov. Meritve podatkov so bile osamljene in ni logično, da bi letalo vrnilo podatek, ob naslednjem obratu radarja pa ne več. V vseh ostalih meritvah podatka ni bilo. Od milijonov zajetih meritev sem dobil eno ali dve meritvi vsakega od zgoraj naštetih podatkov. Iz tega lahko sklepam, da nobeno od letal ni vračalo podatkov o vremenskih nepravilnostih.

2.5 Aplikacija za zajem in shranjevanje podatkov

Prve dele izvorne kode za dekodiranje radarskih podatkov sem napisal v jeziku C# in okolju .NET, ker mi je bilo najbolj pri roki in je bil hitro viden rezultat dela. Iz tega se je sčasoma razvila celotna aplikacija. Najprej je delovala aplikacija za dekodiranje podatkov v okolju Microsoft Windows. Tam sem lahko

na hitro preveril pravilnost dekodiranih podatkov kar s programom Google Zemlja. Kasneje sem dodal module za shranjevanje podatkov, izdelovanje meteoroloških poročil in podobne.

Aplikacija je sestavljena iz več delov in je porazdeljena na več strežnikih glede na stopnjo varnosti. Glavni del teče na strežniku, ki ima dostop do radarskih podatkov, in sprejema radarske podatke preko omrežja. Radarski podatki se distribuirajo po enem od omrežij sistema za kontrolo zračnega prometa kot broadcast ali multicast paketi. Aplikacija "posluša" ta omrežni promet in prejete podatke dekodira ter jih shranjuje v pomnilnik. Dokler je letalo v zraku, so podatki v pomnilniku. Ko letalo odleti iz vidnega območja radarja, jih aplikacija zapiše relacijsko podatkovno bazo in sprosti pomnilnik. Podatki shranjeni v relacijski podatkovni bazi so osnova za drugi in tretji del naloge, ki sta obsegala vrednotenje podatkov in izdelavo meteoroloških poročil.

To okolje je najbolj varovano, saj je potrebno poskrbeti, da radarski podatki pomotoma ne pridejo v nepooblaščen roke.

2.5.1 Vizualizacija radarskih podatkov

Drugi del aplikacije je spletni modul, ki deluje kot vmesnik med javno dostopno aplikacijo in radarskimi podatki. Na eni strani aplikacija streže zahtevam po podatkih kot spletni strežnik, na drugi strani pa jih zahteva od servisa, ki jih zbira. Spletni strežnik je lahko v manj varovanem okolju, ker na njem niso shranjeni radarski podatki. Varovanje mora biti tudi v tem primeru še na visoki ravni, saj je spletna aplikacija v vsakem trenutku sposobna pridobiti podatke o letalih, ki so trenutno v zraku.

Aplikacija Google Zemlja zahteva podatke s spletnega naslova. Tam se nahaja modul, ki od strežnika za zajemanje in hranjenje pridobi podatke o letalih, ki so trenutno v vidnem obsegu radarja. Ker servis za sprejemanje podatkov aktualne informacije hrani v pomnilniku, jih lahko takoj posreduje spletni aplikaciji. Za to komunikacijo med dvema procesoma se uporablja tehnologija .NET Remoting. .NET Remoting omogoča prenos podatkov med procesi preko omrežja in na hiter in lahek način omogoča porazdeljenost. Spletna stran iz posredovanih podatkov skreira XML datoteko po standardu KML (Google, [14]). Program Google Zemlja zna prebrati KML format 3D objektov in jih prikazati. Tako lahko vidimo vsa letala, ki so trenutno v dosegu radarja.

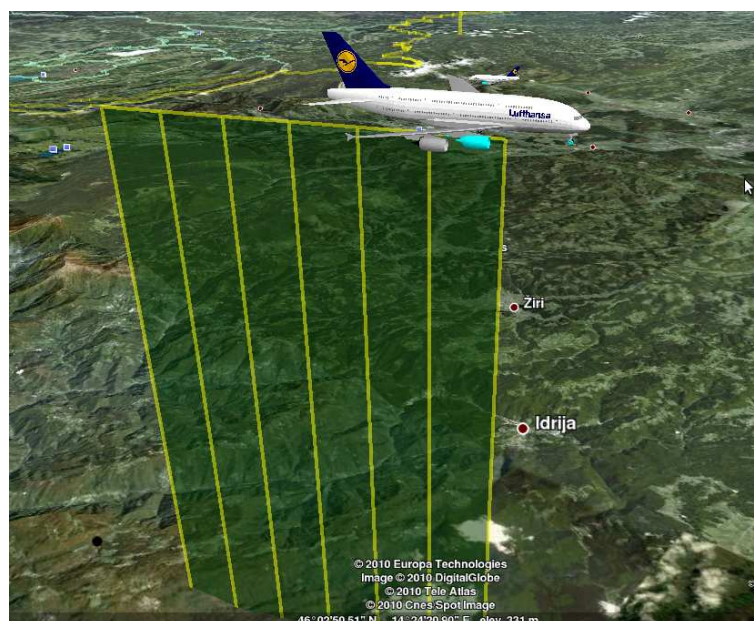
Program Google Zemlja periodično zahteva vsakič najnovejše podatke od spletne strani. Spletna stran ob vsakem zahtevku le te pridobi od servisa, ki vseskozi sprejema radarske podatke. Tako se slika sproti osvežuje in položaj letal se spreminja na zaslonu tako, kot dejansko letijo po zraku.



Slika 2.4: Primer prikaza letal v programu Google Zemlja

KML

Kot je omenjeno že prej, spletna aplikacija skreira XML stran v formatu KML. Format KML je namenjen predstavitvi 3D objektov. Program Google Zemlja ga uporablja za predstavitev modelov na Zemlji. Z njim so narejena mesta, stavbe in še marsikaj, kar si lahko ogledamo v programu v treh dimenzijah. Zasnovan je objektno, da lahko v en KML model vključimo druge 3D objekte. Tega sem se poslužil pri predstavitvi letal v zraku. Za vsako letalo sem vključil 3D model letala, ga obrnil v smeri vožnje in ga stokrat povečal. Če bi letala pustil v njihovi pravi velikosti, bi bila zelo težko vidna. Za tip letala bi lahko uporabil 3D model, ki bi predstavljal točno ta tip letala in s tem takoj vizualno prikazal, kakšno letalo se nahaja na tem mestu. Z uporabo pozivnega znaka pa bi bilo možno izbrati model, ki bi bil pobarvan, kot je pobarvano letalo družbe, kateri pripada. S tem bi bila predstavitev zares popolna, a je problem v tem, ker bi bilo potrebno narediti ogromno število 3D modelov letal. Morali bi imeti vse tipe letal in še vsak model pobarvan v barvah vseh



Slika 2.5: Primer prikaza enega letala v programu Google Zemlja

prevoznikov, ki ga uporabljajo. Na primer: Airbus 380 v barvah Singapore Airlines, Emirates,... V svoji aplikaciji uporabil le en tridimenzionalni model letala. Na internetu je možno dobiti različne modele letal, a bi moral vsakega posebej vsaj malo predelati, da bi bil dober za uporabo v tej aplikaciji. Kot prvo je potrebno zagotoviti, da so velikosti modelov prave. Drugi pogoj pa je orientacija modela v svojem koordinatnem sistemu. Različna letala v zraku morajo biti primerljiva po velikosti in obrnjena v smeri leta. Modeli, ki so na voljo na internetu, žal ne ustrezajo naštetima dvema pogojema, poleg tega pa so narejeni z različnimi stopnjami natančnosti. Skratka modeli so zelo različni, ker jih delajo različni ljudje. Ker nisem imel ustrezne programske opreme za obdelavo teh modelov in, ker ni glavni cilj naloge predstavitev posameznih letal v zraku, sem uporabil le en model za vsa letala.

Ob vsaki spremembi položaja se od letala nariše še črta do tal, ki prikazuje, kako visoko je letalo. Prikazane so črte za zadnjih 30 sekund in nam povedo zelo veliko. Takoj se vidi, če se letalo dviga ali spušča, ali pa je morda v zavoju. Ker se črte rišejo ob enakih časovnih intervalih, lahko iz razmaka med posameznimi črtami takoj razločimo, kako hitro je letalo. Bolj oddaljene črte pomenijo hitro letalo in črte blizu skupaj prikazujejo počasno letalo. Na sliki 2.5 je prikazan primer letala in črt za njim, ki prikazujejo, kje je letalo letelo.

Vse 3D objekte se v datoteko KML postavi v WGS 84 koordinatnem sis-

temu. Za vsak objekt je torej potrebno navesti zemljepisno širino in dolžino ter nadmorsko višino. Poleg tega je potrebno navesti še velikost in orientacijo. Tako so postavljeni modeli letal v zračni prostor. Črte so predstavljene z vgrajenimi gradniki črt in lomljenk. Program Google Zemlja zna prikazati tako predstavljene objekte. Iz radarskih koordinat je potrebno položaj pretvoriti po postopku, ki je predstavljen v poglavju 2.2.2 in sestaviti datoteko KML, kot je predstavljena v primeru spodaj.

Primer datoteke KML

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<kml xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2">
  <Document>
    <name>paths</name>
    <description>3d models of airplanes flying in Slovenian
      airspace</description>
    <Style id="yellowLineGreenPoly"><LineStyle><color>7f00ffff</
      color><width>4</width></LineStyle><PolyStyle><color>7
      f00ff00</color></PolyStyle></Style>
    <Placemark>
      <name>LZB500</name>
      <description>LZB500</description>
      <styleUrl>#yellowLineGreenPoly</styleUrl>
      <LineString>
        <extrude>1</extrude>
        <tesselate>1</tesselate>
        <altitudeMode>absolute</altitudeMode>
        <coordinates>13.458359668062, 47.1267293480683, 10668
          13.5888848000723, 47.1102312853604, 10668
          13.6046797132252, 47.1093366572513, 10668
          13.6154669958863, 47.1068580667637, 10668
          13.6260419978463, 47.104051233354, 10668
          13.6382590660519, 47.1022715693981, 10668
          13.6463512559187, 47.0989471436972, 10668
          13.659824226872, 47.0975602385229, 10668
          13.6756198980575, 47.0972368605246, 10668
          13.6861212359467, 47.0946925758262, 10668
          13.7094349166162, 47.0899502157083, 10668
          14.4946921006764, 46.915524941614, 10668
          14.5495012702408, 46.8886819356164, 10668
        </coordinates>
      </LineString>
      <Model id="LZB500">
        <altitudeMode>absolute</altitudeMode>
        <Location>
          <longitude>15.4799742346713</longitude>
          <latitude>46.6714586047747</latitude>
```

```
    <altitude>10668</altitude>
  </Location>
  <Orientation>
    <heading>30.0</heading>
    <tilt>0.0</tilt>
    <roll>0.0</roll>
  </Orientation>
  <Scale>
    <x>100.0</x>
    <y>100.0</y>
    <z>100.0</z>
  </Scale>
  <Link>
    <href>planes/a380_lufthansa.dae</href>
  </Link>
</Model>
</Placemark>
</Document>
</kml>
```

2.5.2 Ostali moduli

Za testiranje sem si naredil še pomožne module. Eden od njih je aplikacija, ki simulira pošiljanje radarskih podatkov iz radarskega posnetka. To aplikacijo sem potreboval zato, da sem lahko testiral sprejemanje podatkov preko omrežja brez priklopljanja v dejansko omrežje, kjer se podatki nahajajo. Ko je bilo sprejemanje temeljito stestirano, sem šele lahko aplikacijo za prejetje vklopil v omrežje z živimi radarskimi podatki. Priklop nepreverjene programske opreme v katerokoli omrežje kontrole zračnega prometa lahko predstavlja varnostno tveganje, ki si ga pod nobenim pogojem ne smemo privoščiti.

Modul za predvajanje posnetkov se je izkazal za zelo uporabnega. Kljub temu, da imamo v kontroli zračnega prometa orodja, ki nam omogočajo predvajanje posnetkov za potrebe varnostnih analiz in preiskav v primeru ogrožene varnosti, vsi radi posežejo tudi po tem orodju, ker je preprosto za uporabo in omogoča pogled na razmere v zračnem prostoru na drugačen način.

2.5.3 Razvojno okolje in orodja

Za izdelavo aplikacije sem najprej uporabljal Visual Studio 2008, v katerem sem naredil .NET aplikacijo z jezikom C#. Kasneje sem aplikacijo preselil v operacijski sistem Linux. V operacijskem sistemu Linux sem za poganjanje

poganjanje .NET aplikacij uporabil proizvod Mono, ki vsebuje okolje za izvajanje in vse potrebne prevajalnike. Prevedeni .NET programi so binarno združljivi in jih je možno izvajati v obeh okoljih. Prevedeno .NET aplikacijo lahko torej brez vsakršnih sprememb izvajamo v Windows ali Linux okolju. Okolje za razvijanje .NET aplikacij v operacijskem sistemu Linux je MonoDevelop. Za relacijsko podatkovno bazo sem uporabil MySQL.

Modul, ki sprejema, dekodira in shranjuje podatke v okolju Microsoft Windows deluje kot servis (Windows Service). V okolju Linux isti modul tudi deluje v ozadju kot daemon.

Odločil sem se, da bom v testnem obdobju zajemal podatke s strežnikom, ki bo imel instaliran Linux operacijski sistem. V vsem času testnega obdobja je strežnik deloval brez problemov. Prekinitev zajemanja podatkov je bila ročno sprožena le dvakrat za kratek čas zaradi velike količine shranjenih podatkov. Podatkovno bazo je bilo potrebno sprazniti in narediti rezervne kopije podatkov, ker je zmanjkovalo prostora na trdem disku.

Poglavje 3

Vrednotenje podatkov

Ko so bili podatki zajeti, je bil drug del naloge te podatke preveriti in ovrednotiti. Temeljita analiza podatkov je osnova za dobro obdelavo podatkov v realnem času. V zadnjem delu naloge sem se posvetil zajemu podatkov v realnem času in izdelavi meteoroloških poročil na podlagi zajetih podatkov. Izkazalo se je, da je dobra analiza podatkov bistvena za čimboljše izdelave verodostojnih informacij in izločanje slabih meritev.

3.1 Preverjanje pravilnosti radarskih podatkov

Prva naloga vrednotenja podatkov je bila preverjanje pravilnosti branja in pretvorbe radarskih podatkov. Za ta namen sem si izdelal manjšo aplikacijo, ki je prejete podatke prikazala v programu Google Zemlja. Iz teh je bilo možno takoj videti, če so letala prikazana na pravih mestih.

Nastala je zanimiva aplikacija, ki je sposobna v realnem času prikazati trenutno stanje natančnega položaja letal v dosegu radarja, če je priklopljena na radarski tok podatkov. V kontroli zračnega prometa imamo tudi orodja, ki znajo reproducirati radarske tokove podatkov iz posnetkov. Priklop aplikacije na tok podatkov iz posnetka se je izkazal za uporabno orodje pri raznih analizah ali pa samo kot preprost prikaz zračnega prometa. To je seveda samo preverjanje pravilnosti podatkov o položaju letala.

V enem radarskem odčitku je še veliko drugih podatkov, katerih pravilnost sem preverjal tako, da sem na roke dekodiral primere in jih primerjal s tistimi iz programa.

3.2 Kriteriji za izločanje neustreznih meritev

V projektu AMDAR je bilo že nekaj opravljenih analiz kakovosti pridobljenih podatkov. Zato sem se pri vrednotenju oprl na že dognana dejstva iz teh raziskav (B. Schwartz, S.G. Benjamin, 1995, [15]), (B.A. Ballisha, V.B. Kumarb, 2008, [17]), (C. Drüe, W. Frey, A. Hoff, Th. Hauf, 2008, [18]).

V drugih raziskavah za vrednotenje podobnih podatkov je bil uporabljen kriterij, da se uporabijo podatki v oddaljenosti 150km od sonde in v časovnem obdobju 90 minut pred in po času, ko je bila opravljena meritev s sondo (B. Schwartz, S.G. Benjamin, 1995, [15]). Poleg teh kriterijev je za merjenje vetra pomembno, da letalo ne opravlja manevra, ker so v tem času odčitki za smer in moč vetra nenatančni. Večina letal vrača tudi podatke o nagibu letala. Če je nagib letala (roll angle) večji od 5° , je potrebno meritve vetra izločiti. Če se letalo vzpenja ali spušča, je potrebno upoštevati tudi kot dviganja/spuščanja (pitch angle). V tem primeru ne smeta oba kota (roll angle, pitch angle) presegati vrednosti 3° (WMO, 2003, [11]).

3.3 Primerjava podatkov

Izbrati je bilo potrebno metodo, ki bo omogočila primerjavo med seboj najboljše primerljivih podatkov. V podatkih iz sonde imamo natančen odmerek višine iz GPS senzorja pri letalih pa ta podatek ni na razpolago. Podatek o višini letala, ki ga prejme radar je podatek iz višinomera, ki deluje na pritisk. Ta višinomer je nastavljen vedno na standardno atmosfero (ICAO, 1993, [6]). Standardna atmosfera predvideva pritisk $1013,25hPa$ na nadmorski višini $0m$ pri temperaturi $15^\circ C$. Če je pritisk drugačen, višina, ki jo letalo vrača, ni dejanska nadmorska višina, temveč višina glede na pritisk standardne atmosfere (pressure altitude). Če je drugačna tudi temperatura, je razlika lahko še večja. Na višino vpliva tudi relativna vlažnost zraka, a je ta vpliv majhen in standardna atmosfera ne predpisuje vlažnosti. Višina, ki jo vrne letalo radarju torej običajno ni dejanska višina letenja. Preračunavanje višine, ki jo vrne letalo glede na standardno atmosfero, v pravo višino je precej nezanesljivo, ker ne vemo točno, kakšen sta bila ob času meritve dejanski pritisk in temperatura. Ker je vrnjena višina določena glede na standardno atmosfero, lahko enolično in zelo natančno izračunamo, kakšen pritisk je zaznalo letalo v svojem višinomeru po formulah 3.1 in 3.2. Za meteorološke napovedi so podatki zabeleženi ob izmerjenem pritisku bolj pomembni kot dejanska nadmorska višina.

Piloti uporabljajo za nadmorske višine nad 12.500 čevljev standardno atmosfero. Ker imajo vsa letala nastavljena enak pritisk v višinomerih, se dve

letali na različnih "višinah" (pritiskih) ne moreta srečati. Pod višino 12.500 čevljev (ob pristankih in vzletih) pa pilot nastavi v svojem višinomeru pritisk lokalnega letališča. To mu prepreči napako izmerjene višine in morebitno nesrečo zaradi prenizke ali previsoke višine. Pri tej nastavitvi se upošteva le pritisk, ker temperatura in vlažnost ne vplivata tako bistveno na popravek višine. Kljub temu radar vedno od letala dobi podatke o višini glede na standardno atmosfero ne glede na nastavitve pritiska na pilotovem višinomeru.

Do 11.000m nadmorske višine velja:

$$P = P_b \cdot \left(\frac{T_b}{T_b + L_b \cdot h} \right)^{\frac{g_0 \cdot M}{R^* \cdot L_b}} \quad (3.1)$$

Od 11.000m do 20.000m velja enačba:

$$P = P_b \cdot e^{\left(\frac{-g_0 \cdot M \cdot (h - h_b)}{R^* \cdot T_b} \right)} \quad (3.2)$$

Kjer so

P_b = pritisk na nadmorski višini 0m pri standardni atmosferi (1013,25hPa)

T_b = temperatura na nadmorski višini 0m pri standardni atmosferi (288,15K)

L_b = standardna sprememba temperature z višino (-0,0065K/m)

h = nadmorska višina (v metrih)

h_b = višina spodnje ravni (11.000m)

R^* = plinska konstanta za zrak (8,31432Nm/(molK))

g_0 = gravitacijski pospešek (9,80665m/s²)

M = molska masa Zemljinega zraka (0,0289644kg/mol)

Za hitrejše strojno računanje zgornji enačbi lahko poenostavimo. Do 11.000m:

$$P = \frac{1,1970875165717396 \cdot 10^{-10}}{\left(\frac{1}{288,15 - 0,0065 \cdot h} \right)^{5,25593}} \quad (3.3)$$

Od 11.000m do 20.000m:

$$P = 226,321e^{-0,00015769 \cdot (h - 11000)} \quad (3.4)$$

Iz višine, ki je bila javljena preko barometričnega višinomera torej lahko izračunamo pritisk, ki ga je letalo izmerilo. Zelo težko je določiti natančno nadmorsko višino letala glede na lokalne vremenske pogoje. Upoštevati bi bilo potrebno lokalni pritisk, temperaturo in relativno vlažnost. Vsako računanje

bi dalo le približne rezultate. Zato sem iz višine izračunal pritisk in rezultate primerjal med seboj pri enakem pritisku. S tem se izognemo eni od napak, ki bi utegnila bistveno vplivati na dobljene rezultate. Poleg tega meteorološke vertikalne sondaže prikazujejo vrednosti pri posameznih vrednostih zračnega pritiska in ne pri določenih višinah. Za meteorološke napovedi so bolj merodajne meritve na standardnih pritiskovih ploskvah (1000hPa, 950hPa, 925hPa, 900hPa, 850hPa, 800hPa, 750hPa, 700hPa, 600hPa, 500hPa, 400hPa, 300hPa, 200hPa, 100hPa).

Letalo vrača višino zaokroženo na 100 čevljev. Nekatera letala vračajo tudi vrednost izmerjenega pritiska. Javljena višina letala in pritisk morata torej biti v točnem razmerju predpisanem po zgornjih barometričnih formulah. Kjer sem torej od letala dobil izmerjeno višino in pritisk, sem lahko preveril ujemanje višine in pritiska z zgornjimi formulami. Ugotovil, sem, da je ujemanje oz. napaka v enakem razponu kot ga javljajo druge raziskave (W.R. Moninegra, R.D. Mamroshb, P.M. Pauleyc, 2003, [16]), (WMO, 2003, [11]) o kakovosti podatkov zajetih z letal. Pri več kot 99% meritev se meritev pritiska in izračunani pritisk iz dane višine letala ne razlikujeta več kot za 5hPa. Meritev višine letala torej lahko uporabimo za podatek o izmerjenem pritisku.

Priročnik AMDAR vsebuje malenkost drugačne izpeljave barometričnih formul za izračun pritiska iz dane višine (WMO, 2003, [11]).

Do 36.089 čevljev (11.000m) se pritisk izračuna po naslednji formuli:

$$P = 10^{-2} P_b \left(1 - \frac{K_f \alpha h}{T_0} \right)^{\frac{g_0 \rho_0 T_0}{\alpha P_0}} \quad (3.5)$$

Nad 36.089 čevljev (11.000m) velja enačba:

$$P = 226.32 e^{-\frac{h-36089}{20805}} \quad (3.6)$$

Kjer so

- P_b = pritisk na nadmorski višini 0m pri standardni atmosferi (1013, 25hPa)
- T_0 = temperatura na nadmorski višini 0m pri standardni atmosferi (288.15K)
- K_f = pretvorba iz čevljev v metre (0, 3048m/ft)
- α = standardna sprememba temperature z višino (0, 0065K/m)
- h = nadmorska višina (v čevljih [ft])
- ρ_0 = gostota suhega zraka na nadmorski višini 0m (1, 225kg/m⁻³)
- g_0 = gravitacijski pospešek (9, 80665m/s²)

Opravil sem primerjavo obeh izpeljav in ugotovil, da je največja možna ra-

zlika izračunanega pritiska pri isti višini približno 0,0035hPa. To razliko sem ocenil za zanemarljivo.

3.4 Analiza meritev

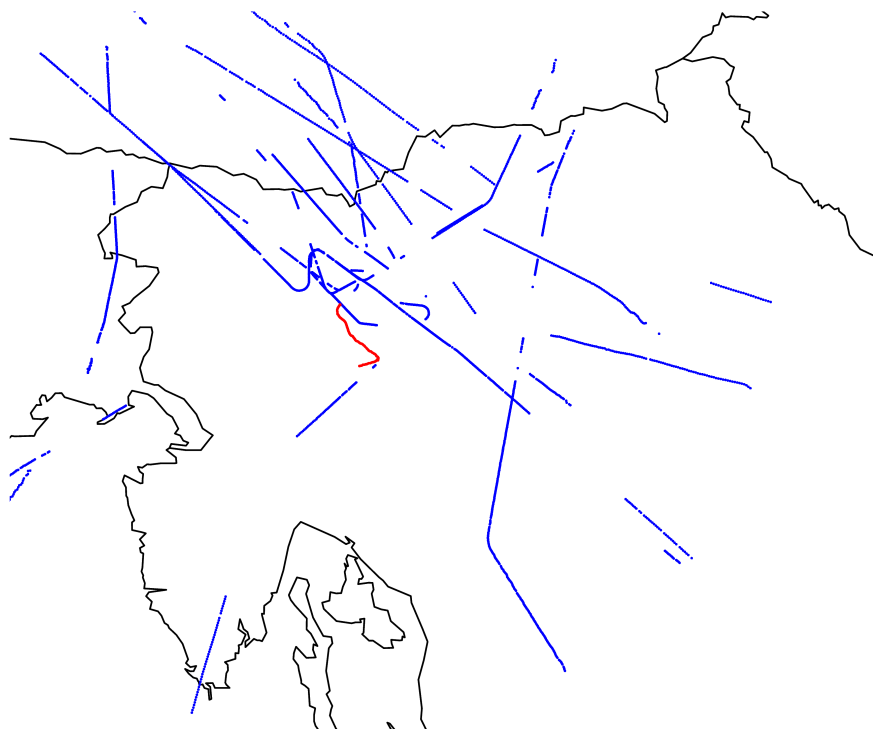
Za analizo meritev sem uporabil kriterije, ki so navedeni v poglavju 3.2. Analiziral sem torej podatke, ki so bili pridobljeni 90 minut pred ali po meritvi sonde in niso oddaljeni od sonde več kot 150km. Pri tem sem upošteval, da se sonda lahko dviga več kot uro in pri tem zaide tudi 80km ali več od mesta, kjer je bila izpuščena. Sondo spuščajo z dvorišča Agencije Republike Slovenije za okolje in neredko jo veter zanese nad Hrvaško, preden se dvigne na končno višino, ki je približno 20,000m. Ker sonda za vsako meritev javlja tudi svoj položaj in čas meritve, sem lahko ta dva podatka upošteval. Na sliki 3.1 je prikazano, kam vse so odtavale sonde po izpustu v testnem obdobju.



Slika 3.1: Potovanje sond v testnem obdobju

Vsaka sondina meritev ima ob sebi tudi točen podatek geografskega položaja, kjer je bila zabeležena. To sem upošteval pri geografskem kriteriju. Letalo je bilo lahko veliko več kot za 150km oddaljeno od mesta, kjer je bila sonda izpuščena. Meritev z letala je še vedno zadostila kriterijem, če je bila oddaljena od položaja, kjer je bila meritev dejansko zajeta, za manj kot 150km. To je lahko pomenilo, da je bila sonda že nekje nad Hrvaško in oddaljenost 150km se je v tem primeru računala od tega položaja.

Meritve z letal dne 3.7.2009



Slika 3.2: Sonda in meritve z letal za 3.7.2009

Podobno ima vsaka sondina meritev ob sebi tudi točen podatek o času, kdaj je bila zabeležena. Balon s sondo se dviga približno uro in pol. Če bi privzel, da so vse meritve bile zabeležene ob času izpusta balona, bi s tem lahko prišlo do nezaželenih napak in za primerjavo bi imel veliko manj meritev. Ponoči, ko se sonda izpusti, je v zraku še zelo malo letal. Zjutraj se promet začne povečevati več kot uro in pol po izpustu sonde. Če računamo, da se meritve

sonde beležijo še uro in pol po izpustu, lahko računamo, da bomo zajeli več meritev z upoštevanjem dejanskega časa zajema meritve s sonde in z letala. Zato sem za vsako meritev s sonde upošteval njen dejanski čas zajema in ga upošteval pri kriteriju časovne oddaljenosti od meritve. Letala, ki so letela v dosegu lahko še tri ure po izpustu sonde, so tudi bila merodajna za primerjavo, ker so se meritve primerjale z zadnjimi meritvami sonde.

Na sliki 3.2 so za primer prikazane meritve z dne 3.7.2009. Sonda je prikazana z rdečo barvo. Z modro so označene meritve z letal, ki so tisti dan bile časovno in geografsko dovolj blizu, da so služile za primerjavo. Rdeče in modre meritve so prikazane s pikami. Ker je meritev precej, so pike dovolj skupaj, da so povezane v zvezne črte.

Poleg točnosti meritev zajetih z letal sem tudi preverjal njihovo odvisnost od oddaljenosti in višine. Za vse meritve temperature, smeri in hitrosti vetra sem preverjal njihovo odvisnost glede na časovno oddaljenost in geografsko oddaljenost. Dodatno sem preverjal tudi odvisnost od višine. Na nižjih višinah so večji vplivi mikrolokalnih vremenskih pogojev in sem zato pričakoval večje odklone pri nekaterih meritvah že samo zaradi višine.

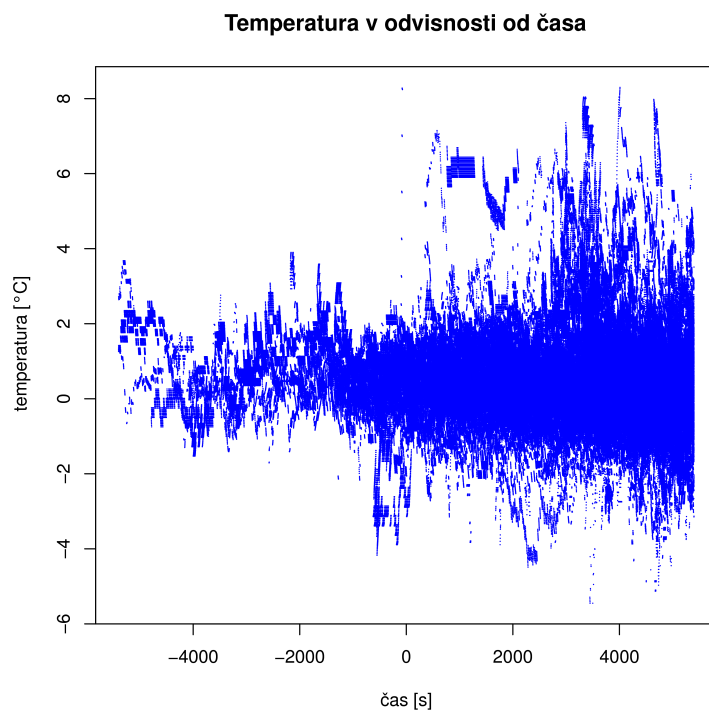
V nekaj primerih je bila sonda pokvarjena in je vračala nesmiselne vrednosti meritev. Te meritve sem izločil pred analizo, ker bi dajale napačne rezultate. Pravo tako sem izločil tudi nekaj najbolj očitnih napačnih meritev z letal.

Količine prikazane v grafih so razlike med izmerjeno vrednostjo sonde in tisto izmerjeno in javljeno z letal.

3.4.1 Temperatura

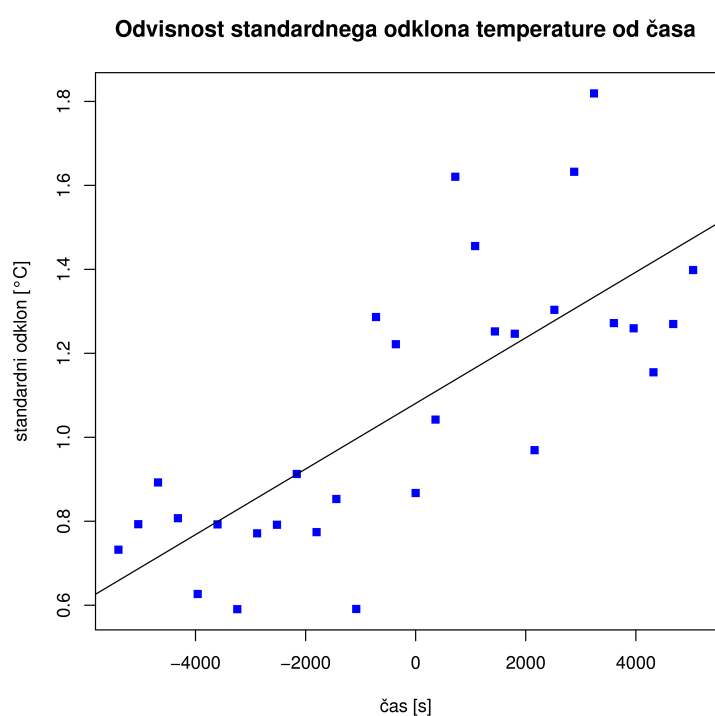
Odvisnost temperature od časa

Sonde se spuščajo v zrak zgodaj zjutraj. Ko vzide sonce, začne temperatura naraščati in takrat so izmerjene malo višje, kar se vidi na slikah 3.3 in 3.4. Na omenjenih slikah je videti po spuščanju sonde večje odklone kot pred tem. Tudi več odklonov je v pozitivno smer, kar pomeni, da letala zaznavajo višje temperature kot sonde. Odkloni navzgor so lahko posledica tega, da se zjutraj temperature prično dvigovati. Opazil pa sem tudi, da se raje zgodi, da letalski termometer kaže previsoko kot prenizko temperaturo. V nočnem času je manj letal in temperature bolj stalne. Verjetno je zato v času pred sondo manj odstopanj.



Slika 3.3: Odvisnost temperature od časovne oddaljenosti

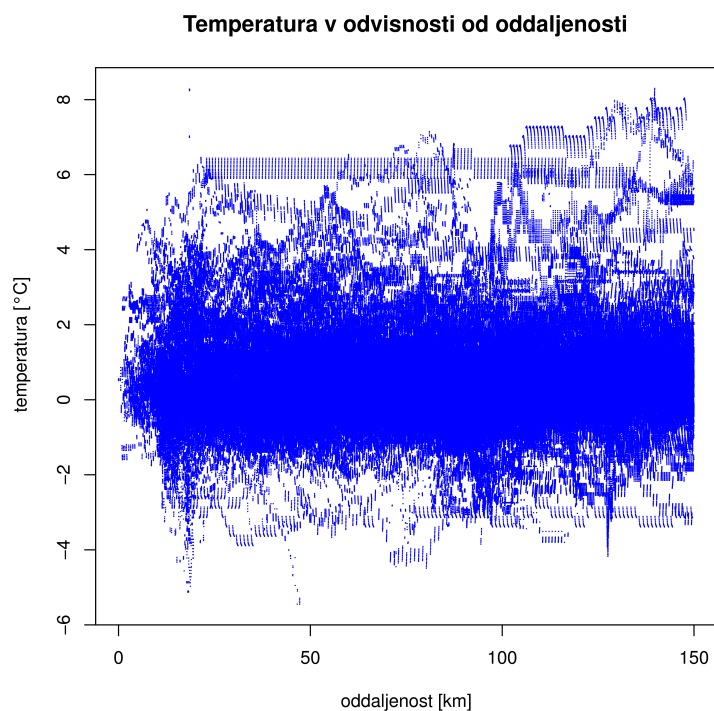
Drug razlog je v tem, da letala, ki letijo pred spuščanjem sonde, ne pristajajo, temveč so le v preletu. To so namreč nočni leti, ko na Brniku skoraj ni vzletov in pristankov. V zgornjih zračnih plasteh so razmere bolj stalne in so manjši lokalni vplivi. Kot je omenjeno v prejšnjem poglavju, je lahko v upoštevanje prišla tudi meritev, ki je bila zabeležena skoraj tri ure po izpustu sonde. Poleg tega so sonde včasih bil izpuščene precej pozneje. Zato se je velikokrat v analizo vključilo precejšnje število meritev letal, ki zjutraj odhajajo z brniškega letališča.



Slika 3.4: Standardni odklon temperature glede na časovno oddaljenost

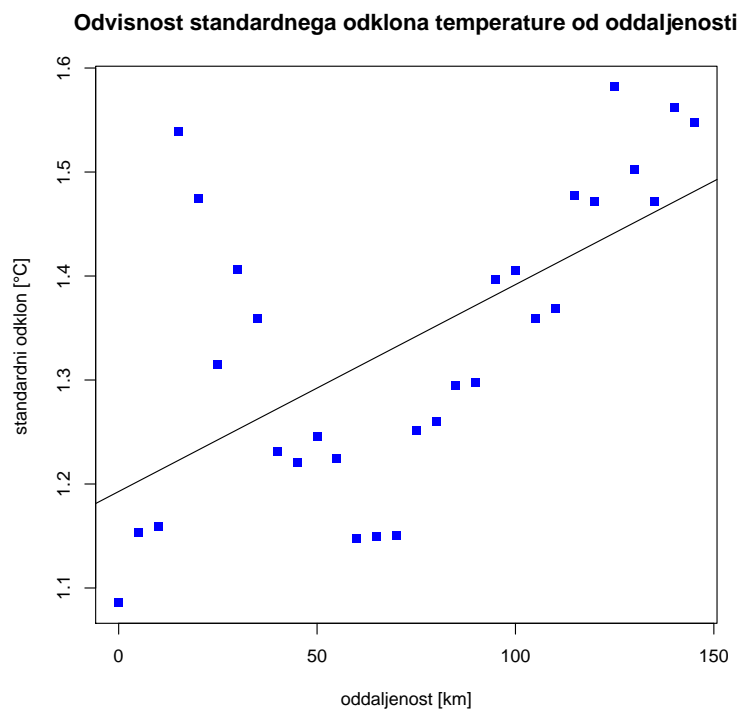
Odvisnost temperature od oddaljenosti

Tudi pri odvisnosti temperature od oddaljenosti se vidi, da je več meritev z letal višjih od sondaž, kar je spet posledica časa spuščanja sonde. Vidi se tudi nekatera letala, ki imajo zamaknjeno meritev in skozi ves graf kažejo enako odstopanje. To se vidi kot pasove, ki imajo enako odstopanje in se raztezajo vodoravno preko grafa, kot se je letalu spreminjala oddaljenost od sonde. Tem bi bilo potrebno umeriti termometre. Možno je tudi, da so letela že v času spremenjenih vremenskih razmer s precej toplejšim ozračjem, a v tem primeru verjetno odklon ne bi bil tako enakomeren. Čeprav se z grafa porazdelitve posameznih meritev na sliki 3.5 tega ne vidi, slika standardnih odklonov 3.6 kaže, da se z geografsko oddaljenostjo razlike izmerjene temperature povečujejo.



Slika 3.5: Odvisnost temperature od geografske oddaljenosti

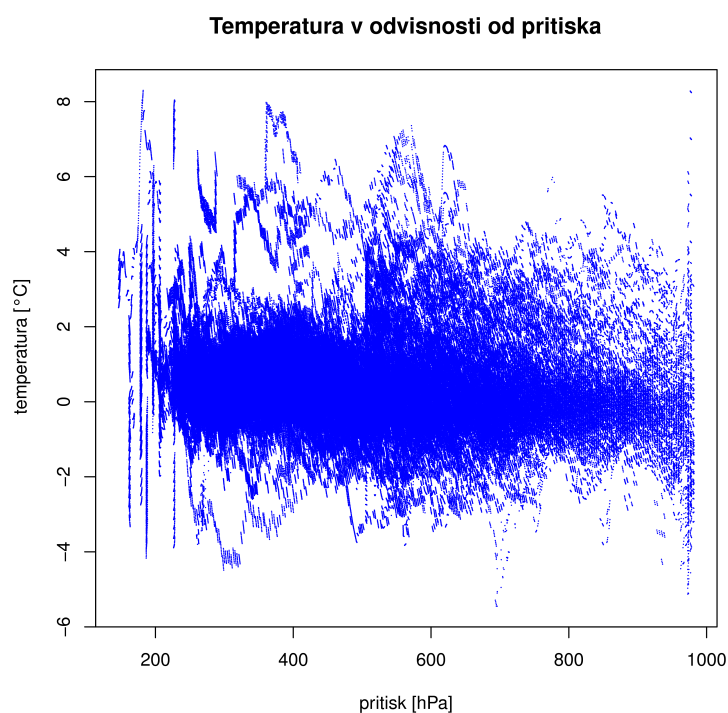
Opazen pa je tudi precej večji odklon na razdalji okoli 20km. Sklepam, da je to vzrok tega, da je razdalja med mestom, kjer se spušča sonda v zrak in letališčem približno 20km. Ta odklon je verjetno lokalna razlika temperature pri tleh.



Slika 3.6: Standardni odklon temperature glede na geografsko oddaljenost

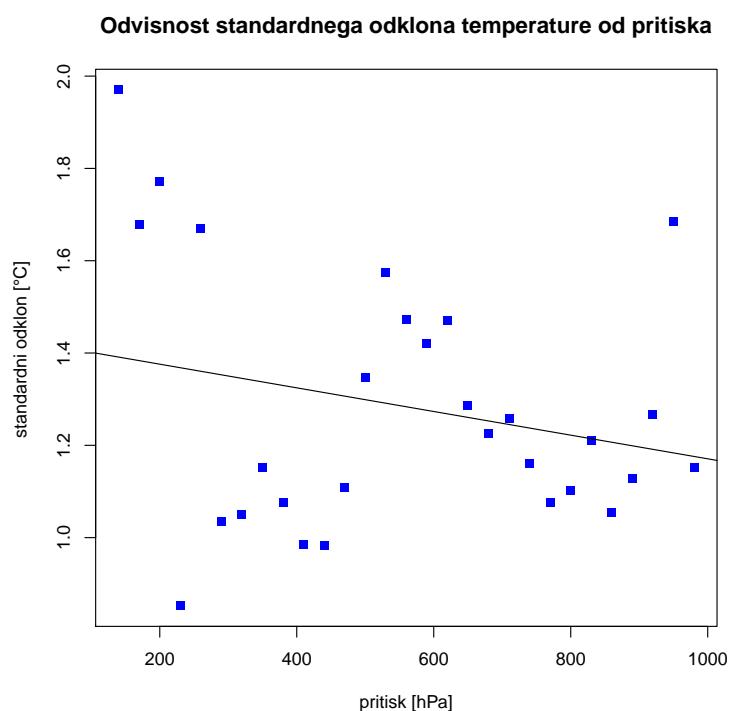
Odvisnost temperature od višine

Meritve temperature na slikah 3.7 in 3.8 ne prikazujejo bistvenih razlik med meritvami na različnih višinah. Treba je biti pozoren, ker je višina označena na x osi grafa predstavljena s pritiskom. Večji pritisk pomeni manjšo višino. Torej višina z oddaljenostjo od ordinate pada in ne narašča.



Slika 3.7: Odvisnost temperature od pritiska (višine)

Presenetljivo je, da je na največjih višinah precejšen odklon temperature, čeprav tega nisem pričakoval. Lahko, da je posledica tega tudi manjše število meritev na večjih višinah, ki ne daje dovolj velikega vzorca. Tudi temperature zabeležene na teh višinah imajo absolutno velike vrednosti (okoli -50°C), zato je večja absolutna napaka normalna. Na manjših višinah se tudi pojavlja odklon, ki precej odstopa. To je posledica lokalnih temperaturnih razlik.

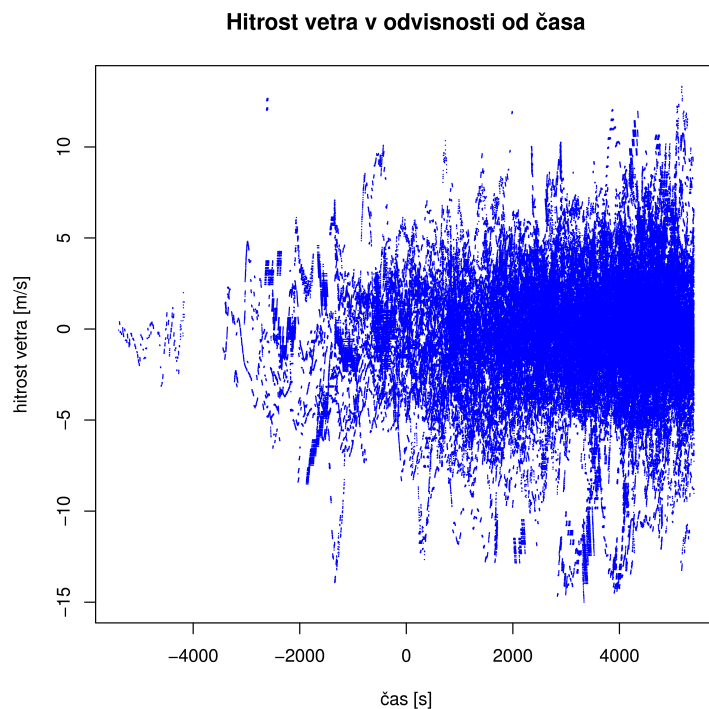


Slika 3.8: Standardni odklon temperature glede na pritisk (višino)

3.4.2 Hitrost vetra

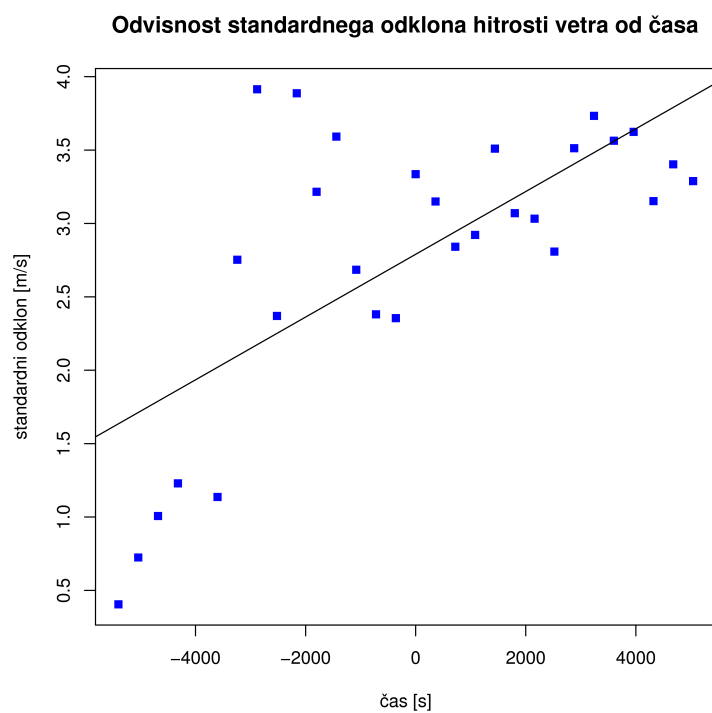
Odvisnost hitrosti vetra od časa

Razlike hitrosti vetrov se povečujejo s časovno oddaljenostjo meritve letala od meritve sonde. Presenetljivo je, da se meritve opravljene pred meritvami sonde razlikujejo zelo malo. Verjetno je to povezano z nočnim časom, ko je manj letal, večjo stabilnostjo ozračja v nočnem času in dejstvu, da so takrat zabeleženi preleti. Slika 3.9 prikazuje porazdelitev razlike v meritvah in njihov standardni odklon v odvisnosti od časa.



Slika 3.9: Odvisnost hitrosti vetra od časovne oddaljenosti

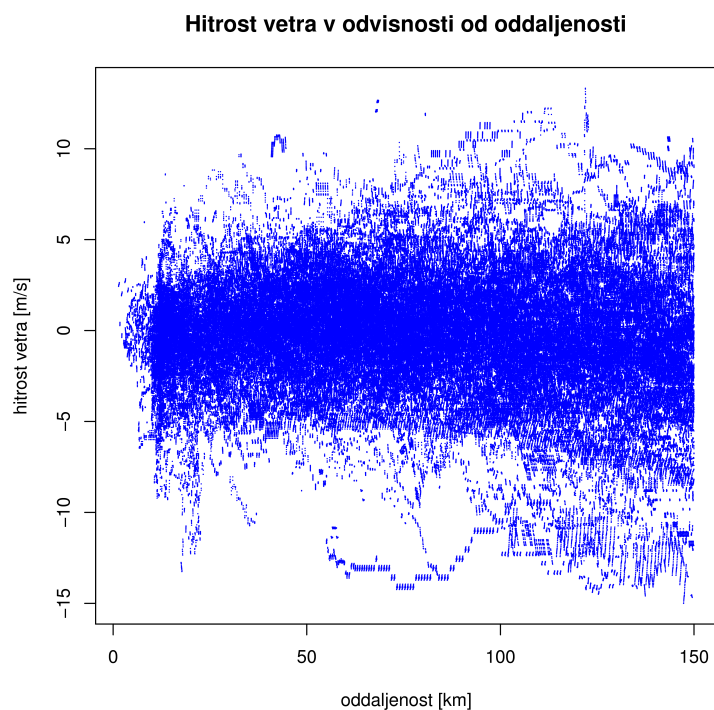
Slika, ki prikazuje odklone v odvisnosti od časa, tudi kaže presenetljivo majhne odklone pred spuščanjem sonde. Ostali odkloni prikazujejo približno enako stopnjo, kjer je mogoče videti majhno povečanje proti koncu.



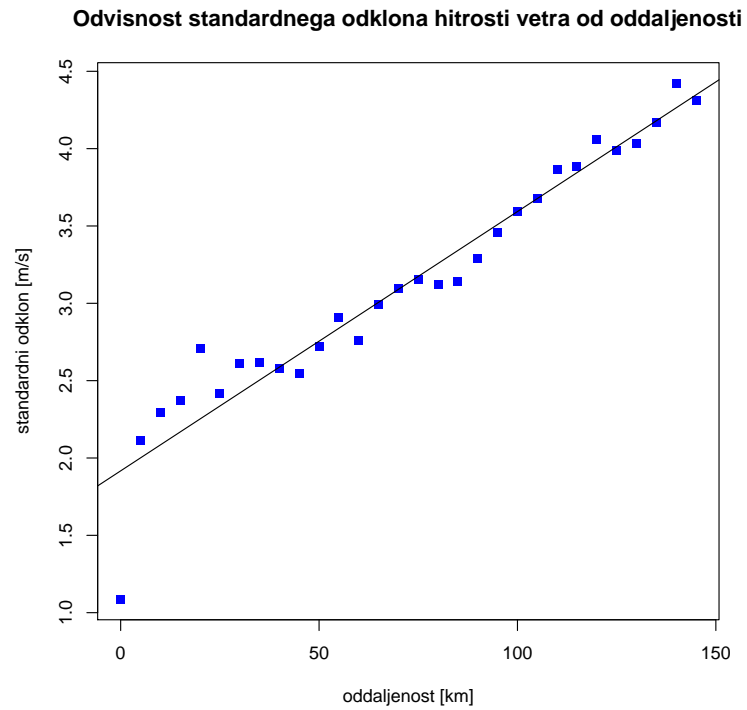
Slika 3.10: Standardni odklon hitrosti vetra glede na časovno oddaljenost

Odvisnost hitrosti vetra od oddaljenosti

Čeprav na sliki 3.11 ni jasno videti, da se z geografsko oddaljenostjo povečujejo razlike v moči vetra, slika s standardnimi odkloni 3.12 to jasno kaže. Tudi pri moči vetra je opaziti nekatere pasove, ki kažejo stalen odklon. To so verjetno letala, ki so prišla v območja z drugačnimi razmerami, ali pa so se razmere med meritvijo sonde in letala že spremenile. Seveda so to lahko tudi napake v meritvah posameznega letala. Da napaka ni tako stalna kot napaka temperature, je jasno, ker merjenje moči vetra ne more biti tako natančno.



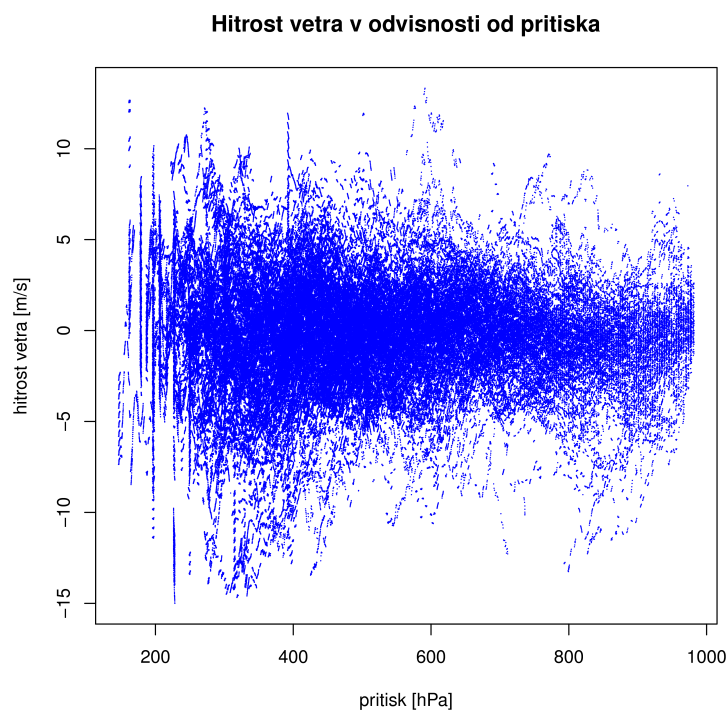
Slika 3.11: Odvisnost hitrosti vetra od geografske oddaljenosti



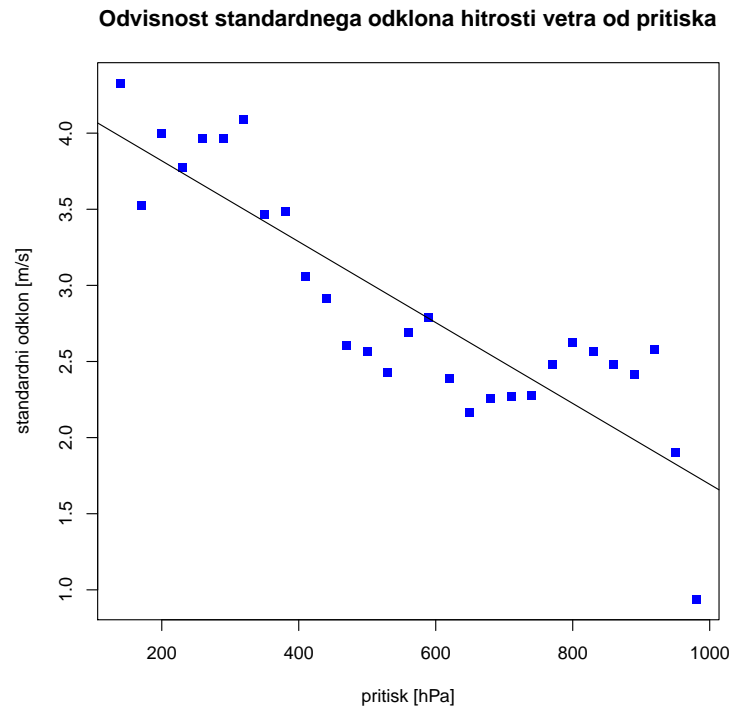
Slika 3.12: Standardni odklon hitrosti vetra glede na geografsko oddaljenost

Odvisnost hitrosti vetra od višine

Glede na lokalne vetrove, ki so precej nestalni v nižjih plasteh ozračja sliki 3.13 in 3.14 kažeta ravno nasprotno. Rezultate si lahko delno razlagamo s tem, da so v višjih plasteh veliko močnejši vetrovi in zaradi tega so lahko tudi napake v meritvah večje. Očitno pa se lokalni vetrovi ne razlikujejo bistveno po moči temveč bolj po smeri, ker jih usmerjajo razne geografske ovire.



Slika 3.13: Odvisnost hitrosti vetra od pritiska (višine)

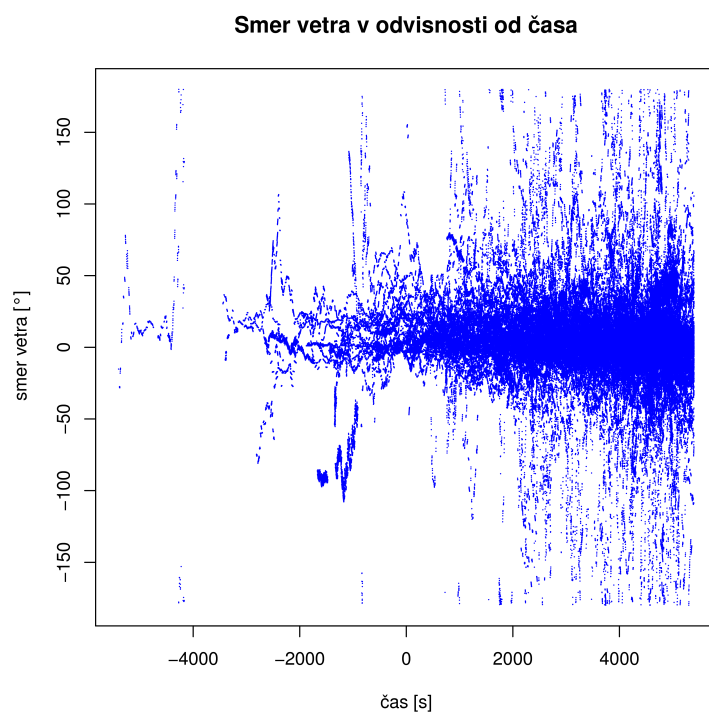


Slika 3.14: Standardni odklon hitrosti vetra glede na pritisk (višino)

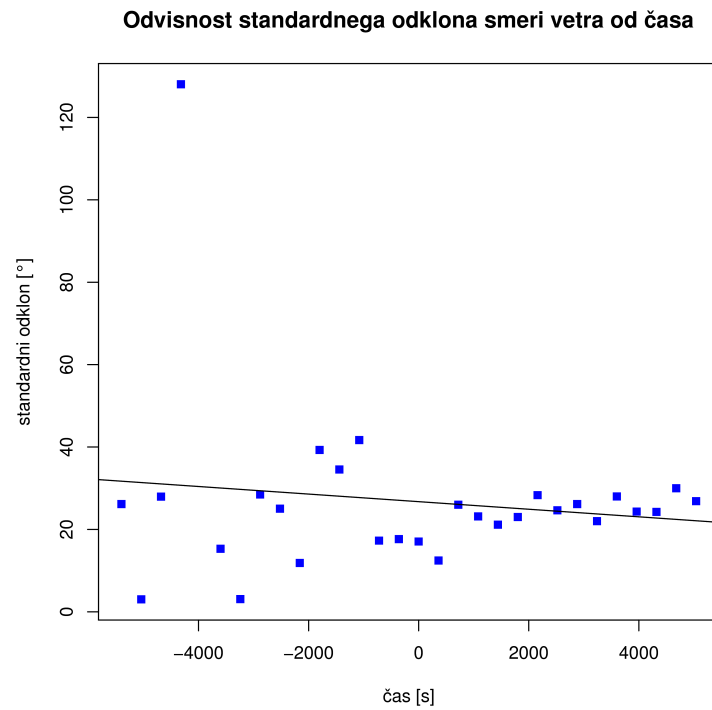
3.4.3 Smer vetra

Odvisnost smeri vetra od časa

Meritve smeri vetra prikazujejo največje odklone, kar je bilo tudi pričakovati. Sliki 3.15 in 3.16 kažeta na to, da so vetrovi precej stalni in časovna oddaljenost nanje vpliva najmanj od vseh merjenih količin. Vetrovom se s časom smer ne spreminja tako močno. Malo je verjetno, da se bo južni veter naenkrat spremenil v severnik. Veliki standardni odkloni pri meritvah povzročajo, da sprememb vetra, tudi če nastopijo, ne zaznamo. To je tudi eden od razlogov, da je videti smer vetra tako stalna.



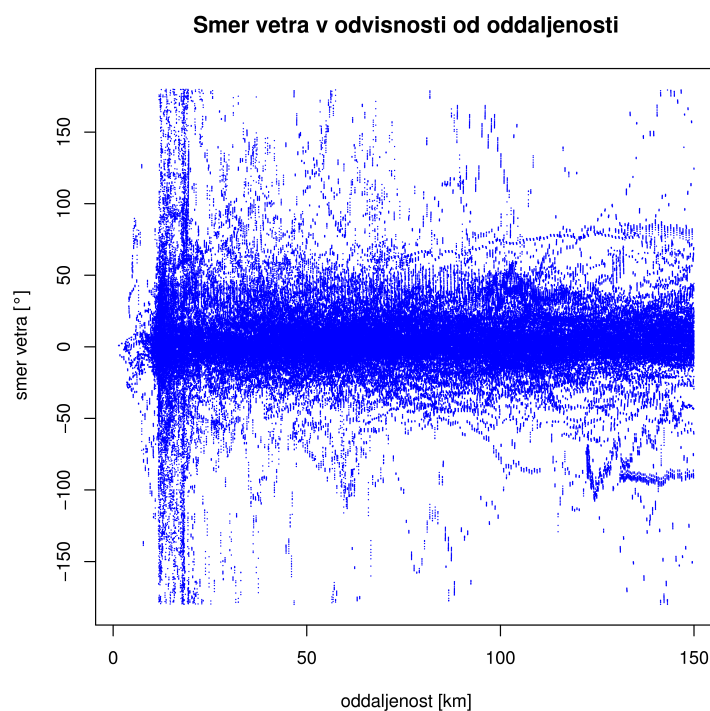
Slika 3.15: Odvisnost smeri vetra od časovne oddaljenosti



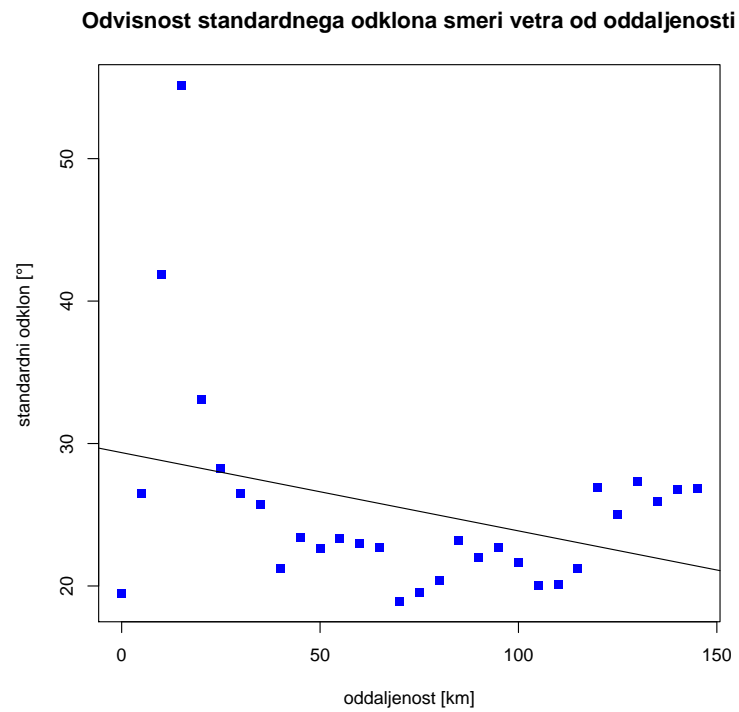
Slika 3.16: Standardni odklon smeri vetra glede na časovno oddaljenost

Odvisnost smeri vetra od oddaljenosti

Sliki 3.17 in 3.18 lepo prikazujeta, kar je bilo pričakovano. Na majhnih oddaljenostih od radarja so letala na običajno na nižjih višinah in tu se vidijo lokalni nižinski vetrovi, ki so nestalni v smeri. Na to delno vpliva tudi dejstvo, da letala pred pristankom in po vzletu izvajajo manevre, ki vplivajo na te meritve. Znano je namreč, da letalo, ki izvaja manever (zavoj, vzpenjanje, spuščanje), ne more izmeriti vetra tako natančno kot tisto, ki leti naravnost. Čeprav so bile meritve z letal, ki so izvajala zavoje izločene, nisem mogel izločiti tistih, ki so se strmo vzpenjala ali spuščala.



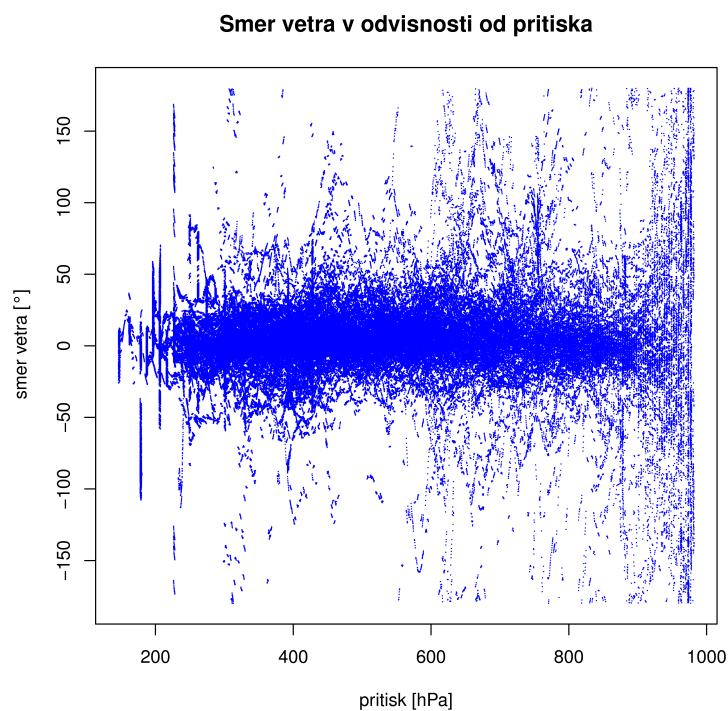
Slika 3.17: Odvisnost smeri vetra od geografske oddaljenosti



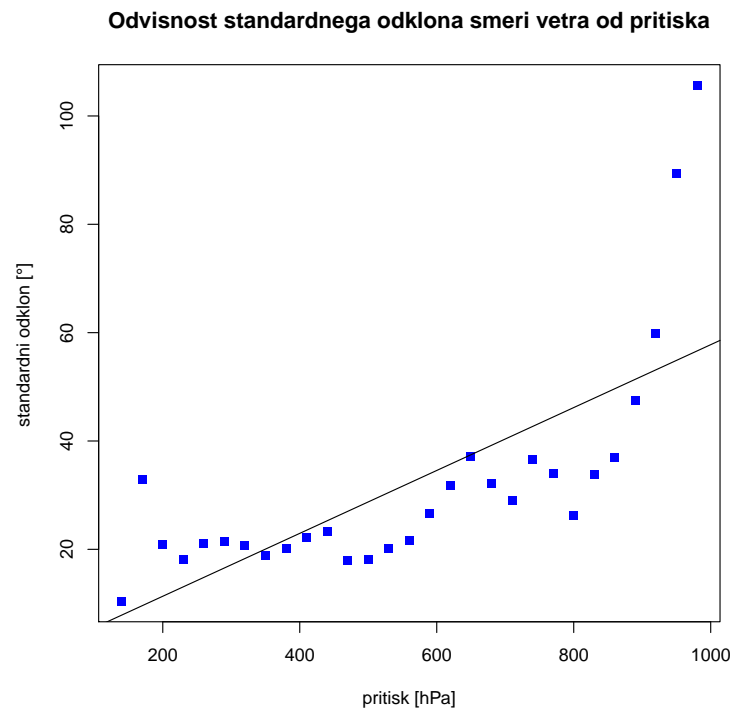
Slika 3.18: Standardni odklon smeri vetra glede na geografsko oddaljenost

Odvisnost smeri vetra od višine

Na slikah 3.19 in 3.20 se še bolje vidi, da na nizkih višinah prevladujejo nestalni lokalni vetrovi. Na večjih višinah so vetrovi zelo stalni in se veliko redkeje spreminjajo. Samo izvajanje manevrov letal na majhnih višinah gotovo ne more razložiti teh velikih odklonov. Še posebej zato, ker so bila meritve z letal med izvajanjem zavojev izločene.



Slika 3.19: Odvisnost smeri vetra od pritiska (višine)



Slika 3.20: Standardni odklon smeri vetra glede na pritisk (višino)

Poglavje 4

Izdelava meteoroloških poročil

Vrednotenje in analiza pridobljenih podatkov in primerjava s podatki pridobljenimi iz sond so bile osnova za aplikacijo, ki bo sposobna iz podatkov pridobljenih z letal sama izdelati navpični profil ozračja. Manjka sicer podatek o relativni vlažnosti, ker tega letala še ne merijo. Ostanejo še vedno temperatura ter smer in jakost vetrov. Za kontrolo zračnega prometa je najpomembnejši podatek o vetrovih na različnih višinah. Z zajemom podatkov želim izdelati podoben profil višinskih vetrov, kot ga izdeluje služba za letalske vremenske napovedi. Če bo ujemanje zadovoljivo, je lahko ta tabela nadomestek v primeru izpada letalske napovedi.

Rešitev, ki sem jo naredil vseskozi dobiva podatke z radarja. Najprej preveri, če meritev ustreza kriterijem. Kriteriji so isti, kot sem jih upošteval že pri vrednotenju podatkov in primerjavi s sondami. To sta oddaljenost in nagib letala. Letala, ki so preveč oddaljena imajo lahko drugačne vremenske pogoje in letala s prevelikim nagibom ne merijo vetra dovolj natančno zaradi manevrov, ki jih izvajajo. Poleg teh sem upošteval še druge kriterije, ki so razloženi v tem poglavju.

Letala v projektu AMDAR zbirajo podatke nekaj minut, nato pošljejo povpreček kot eno sporočilo. Ta povprečja računajo na različne načine. Odčitki z instrumentov prihajajo od šestnajstkrat do enkrat na sekundo.

Radar dobi vrednost enkrat na obrat. V našem primeru je to na štiri sekunde. Žal ne vem, ali je dobljena vrednost že na kakšen način povprečena, ali je to trenutni odčitek z naprave.

Projekt AMDAR predlaga naslednjo formulo za povprečenje meritev:

$$Y_n = \frac{3t(y_n - Y_{n-1})}{T} + Y_{n-1}. \quad (4.1)$$

Kjer so

- Y_n = dobljena vrednost v n-tem koraku
- Y_{n-1} = prejšnja izračunana vrednost
- y_n = meritev v n-tem koraku
- t = interval vzorčenja
- T = interval povprečenja, ki mora biti veliko večji od t . Na primer:
 $T = 10s, t < 1s$.

Menim, da je za podatke pridobljene preko radarja Kalmanov filter bolj primerna metoda za izračun čimbolj natančnega približka dejanske vrednosti. Letala uporabljajo bolj preproste metode, ki najverjetneje niso tako učinkovite, a so očitno zadovoljivo dobre.

4.1 Kalmanov filter

Pri zbiranju podatkov sem se odločil, da bom uporabil Kalmanov filter za določanje prave vrednosti posamezne meritve. To je matematična metoda, ki jo je leta 1960 razvil R. E. Kalman (R.E. Kalman, 1960, [20]) in se veliko uporablja predvsem pri meritvah, ki vračajo rezultate z napakami. Metoda upošteva napake meritev in daje zelo dobre rezultate. Vse to pa deluje tako, da ni potrebno hraniti prejšnjih meritev temveč ob vsaki meritvi popravimo uteži, s katerimi določimo vpliv nove meritve na že izračunano vrednost iz prejšnjih meritev.

4.1.1 Opis Kalmanovega filtra

Opis Kalmanovega filtra je povzet po odlični predstavitvi, ki sta jo napisala Greg Welch in Gary Bishop (G. Welch, G.Bishop, [22]).

Opis procesa

Kalmanov filter je splošna rešitev za ugotavljanje vrednosti $x \in \mathfrak{R}^n$. Z vsako meritvijo dobimo vrednosti $z \in \mathfrak{R}^m$, na katero vplivajo napake. V k-tem koraku so iskane vrednosti vektorja x

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}, \quad (4.2)$$

ki jo dobimo z meritvami zabeleženih v vektorju vrednosti z

$$z_k = Hx_k + v_k. \quad (4.3)$$

Naključni vrednosti w_{k-1} in v_k predstavljata napako vrednosti x v k -tem koraku in napako meritve z ter sta med seboj neodvisni. Predpostavimo, da sta napaki normalno porazdeljeni

$$p(w) \sim N(0, Q), \quad (4.4)$$

$$p(v) \sim N(0, R). \quad (4.5)$$

Q in R sta kovariančni matriki porazdelitve in predpostavimo, da sta skozi ves proces enaki.

A , B in H iz enačb 4.2 in 4.3 so matrike. Matrika A dimenzij $n \times n$ predstavlja razmerje med prejšnjimi vrednostmi s sedanjimi brez upoštevanja kontrole ali napak. Matrika B predstavlja krmiljenje procesa, ki bi ga lahko uporabljali za popravek ob vsakem koraku, da bi vplivali na potek. Metoda je bila razvita za vodenje raketnih sistemov in zato vključuje tudi krmiljenje, ki pa ga v svojem primeru ne potrebujem. Če ob vsakem koraku vplivamo s krmilnimi vrednostmi $u \in \mathfrak{R}^l$, ima matrika B dimenzije $n \times l$. Matrika H iz enačbe 4.3 predstavlja spremembe od prejšnje do naslednje meritve brez upoštevanja napake. Za matriki A in B privzamemo, da sta konstantni.

Računske osnove za filter

Definirajmo $\hat{x}_k^- \in \mathfrak{R}^n$, ki je naša predhodna (*a priori*) ocena vrednosti v k -tem koraku z znanjem o procesu iz prejšnjih korakov. $\hat{x}_k \in \mathfrak{R}^n$ pa naj bo naša naknadna (*a posteriori*) ocena vrednosti v k -tem koraku, po upoštevanju meritev z_k . Na podlagi teh ocen lahko določimo napaki $e_k^- \equiv x_k - \hat{x}_k^-$ in $e_k \equiv x_k - \hat{x}_k$.

Medsebojna povezanost napak ali standardni odklon predhodnih ocen je

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}] \quad (4.6)$$

in medsebojna povezanost ali standardni odklon naknadnih ocen je

$$P_k = E[e_k e_k^T]. \quad (4.7)$$

Naš cilj je najti enačbo, ki bo izračunala naknadno oceno vrednosti \hat{x}_k kot linearno kombinacijo predhodne ocene vrednosti \hat{x}_k^- in utežene razlike med dobljeno meritvijo in napovedjo meritve $H\hat{x}_k^-$. Taka enačba je

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-). \quad (4.8)$$

Razliko $(z_k - H\hat{x}_k^-)$ imenujemo *ostanek*, ki predstavlja razliko med napovedano in dejansko meritvijo.

Matrika K dimenzij $n \times m$ je popravek, ki minimizira medsebojno povezanost naknadnih ocen 4.7. Postopek, ki je podrobneje opisan v (G. Welch, G. Bishop, [22]), in ki združi nekaj od zgoraj naštetih enačb in odvede funkcijo po spremenljivki K , najde naslednji minimum

$$K_k = \frac{P_k^- H^T}{HP_k^- H^T + R} \quad (4.9)$$

Iz enačbe 4.9 lahko razberemo, da je ob majhni medsebojni odvisnosti R ostanek bolj obtežen, kar pomeni, da h končnemu rezultatu večjo težo daje dejanska meritev. Nasprotno pa majhni medsebojni odvisnosti predhodnih ocen povzroča, da K ostanek manj obteži in k dejanskemu rezultatu več prispeva napovedana meritev. Z drugimi besedami. Tista vrednost (napoved ali dejanska meritev), ki je bolj enakomerno porazdeljena, več prispeva, k dejanskemu rezultatu.

Algoritem

Kalmanov filter poskuša dobiti čimbolj točne vrednosti procesa, ki ga spremlja, z upoštevanjem napak pri meritvah in pri poteku procesa. Enačbe filtra lahko razdelimo na dva dela.

Prve imenujemo časovni popravek (napoved) in poskušajo napovedati vrednosti procesa za čas v prihodnosti z napovedjo predhodne ocene vrednosti in pripravo le teh za naslednji korak. Formuli 4.10 in 4.11 predstavljata časovni popravek ali napoved procesa.

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (4.10)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (4.11)$$

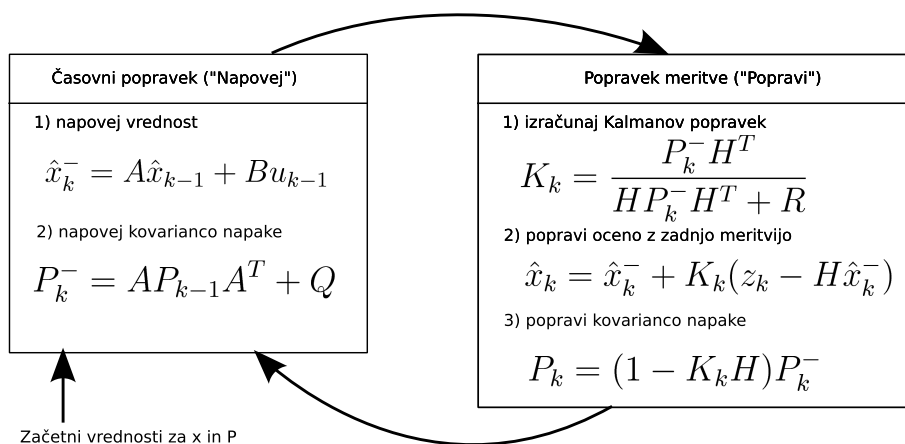
Drugo skupino enačb imenujemo popravek meritve in so nekakšne vrste povratna informacija, ki na podlagi zadnje meritve in predhodne ocene dobijo

čimboljšo naknadno oceno vrednosti. Formule 4.12, 4.13 in 4.14 predstavljajo ta korak.

$$K_k = \frac{P_k^- H^T}{H P_k^- H^T + R} \quad (4.12)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4.13)$$

$$P_k = (1 - K_k H) P_k^- \quad (4.14)$$



Slika 4.1: Kalmanov algoritem

V vsakem ciklu Kalmanovega algoritma torej dobimo predhodno in naknadno oceno vrednosti, ki nam predstavljata napoved in najboljši približek vrednosti na podlagi dosedanjih meritev.

Iz slike 4.1 lahko vidimo, da je za realizacijo v programski opremi Kalmanov filter primeren tudi zato, ker ne zahteva shranjevanja prejšnjih meritev. S količino meritev torej ne raste potreba po računskih ali pomnilniških virih.

Parametri in nastavitve

Za pravilno delovanje algoritma moramo primerno izbrati začetne vrednosti.

Za vrednost x_0 je najlažje izbrati kar prvo meritev. Če smo popolnoma prepričani, da smo dali x_0 pravo vrednost, bi lahko P_0 , ki predstavlja mero nezanesljivosti, nastavili na 0. Ker vemo, da je meritev nezanesljiva, P_0 nastavimo na vrednost različno od 0, običajno 1.

Učinkovitost Kalmanovega filtra lahko povečamo s pravilnimi nastavitvami kovariančnih matrik R in Q . Ti matriki imata vpliv na filter tako, da se s pravilno nastavljenimi vrednostmi vrednost veliko prej ustali in ne skače z vsako meritvijo. Z nastavitvijo prevelikega odklona bo filter manj verjel meritvam in dlje časa bo trajalo, da se bo ustalil na pravi vrednosti. S premajhnim odklonom pa bomo dosegli, da bo na filter bolj vplivala vsaka sprememba meritve, saj je ne bo smatral za napako temveč za spremembo.

Porazdeljenost meritev je razmeroma lahko dobiti, saj jih moramo tako ali tako beležiti. Z vzorcev meritev lahko dobimo podatke, ki jih obdelamo in dobimo iz njih standardne odklone, ki nam služijo kot vhod za filter. Težje je dobiti prave vrednosti odklonov za krmilne podatke. Tu je potrebno imeti več izkušenj in s poskušanjem ter ocenami nastaviti prave vrednosti. Pri svoji implementaciji krmilnega mehanizma za proces nisem imel, torej mi ni bilo potrebno določati odklonov za vrednost Q .

Sem pa moral določiti odklone meritev R . Zaradi tega sem v svoji nalogi precej časa posvetil temu, da sem v filtre vnesel parametre, ki bodo čimbolj hitro in zanesljivo dali vrednost, ki ji bomo lahko zaupali. Rezultati so predstavljeni v 3.4.

4.1.2 Poenostavitve uporabljenega Kalmanovega filtra

Kalmanov filter, ki sem ga na kratko opisal zgoraj je zelo splošen postopek in predvideva veliko stvari, ki jih v svojem delu nisem potreboval. Zato sem lahko postopek poenostavil.

Kot prvo Kalmanov filter predvideva, da se z eno meritvijo dobi več meritev z , iz katerih dobimo več vrednosti x . V mojem primeru, sem vsako vrednost vodil posebej v svojem filtru, torej nisem potreboval vektorjev in matrik in sem s tem zelo poenostavil enačbe in računanje.

Druga poenostavitev je ta, da ni krmiljenja procesa, torej del z matriko B odpade.

Naslednja posplošitev filtra predvideva, da se meritev razlikuje od tiste vrednosti, ki jo iščemo in jo moramo poiskati s pomočjo matrike A . Ker sta bili v mojem primeru meritev in vrednost, ki sem jo iskal, isti, sem lahko privzel $A = 1$.

Ker predpostavimo, da sta meritev in vrednost, ki jo iščemo, isti, ne potrebujemo pretvorbe iz meritve z_k v x_k . Torej lahko izpustimo tudi matriko H .

S tako poenostavljenim filtrom je veliko lažje računati in menim, da je nesmiselno izvajati komplicirane operacije vektorjev in matrik, če to ni potrebno.

Poenostavljen korak časovnega popravka ali napovedi meritve, ki vključuje vse zgoraj naštete poenostavitve, je predstavljen z enačbama 4.15 in 4.16.

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1} \quad (4.15)$$

$$P_k^- = P_{k-1} \quad (4.16)$$

Podobno z upoštevanjem poenostavitev dobimo enačbe 4.17, 4.18 in 4.19, ki predstavljajo korak popravek meritve.

$$K_k = \frac{P_k^-}{P_k^- + R} \quad (4.17)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - \hat{x}_k^-) \quad (4.18)$$

$$P_k = (1 - K_k)P_k^- \quad (4.19)$$

Ker vsako meritev vodimo v svojem filtru, ima vsak le eno dimenzijo in vse matrike ter vektorji imajo dimenzijo 1. Tako izračunavamo formule z realnimi števili namesto z matrikami in vektorji.

4.2 Opis rešitve

Aplikacija vseskozi sprejema podatke z radarja in jih zbira. Zato, da sem lahko dobil podatke za vse višine in letala, sem vse skupaj realiziral z množico Kalmanovih filtrov. Ozračje sem razdelil na plasti in sicer na dva načina. Prva delitev združuje skupaj plasti ozračja, ki se med seboj razlikujejo po 1000 čevljev višine. To ustreza višinam letenja, ki jih uporabljajo letala (flight levels). Piloti merijo višino letala z enoto FL (flight level), ki predstavlja 100 čevljev razlike v višini pri standardnem pritisku. 10FL torej predstavlja 1000 čevljev. To je približno 300m.

Vsako meritev sem torej uvrstil v enega od teh razredov in jo dodal kot meritev v Kalmanovem filtru za ta razred. Ker letala v glavnem letijo na višinah, ki so deljiva z 10 (110, 120, 130,...), ni pričakovati velikih odklonov zaradi letal, ki bi letela tik pod ali nad mejo razreda. Izjeme so seveda letala, ki se dvigajo ali spuščajo, a ta običajno vrnejo meritve od spodnje do zgornje meje razreda.

S tem dobimo prerez ozračja razdeljen po višinah letenja v natančno taki obliki, kot ga kontrola zračnega prometa prejema kot del letalskih napovedi.

Ta prerez ozračja je za kontrolo zelo pomemben, ker se s pomočjo višinskih vetrov izračunavajo časi preletov posameznih letal skozi zračni prostor. Lahko si mislimo, da je čas preleta letala z zračno hitrostjo 400 vozlov precej drugačen, če leti z vetrom hitrosti 100 vozlov ali proti njemu. Zračna hitrost 400 vozlov in 100 vozlov nasprotnega vetra povzročita, da se letalo giblje nad ozemljem z hitrostjo 300 vozlov. Razumljivo veter v smeri letenja letalu pomaga in to se giblje nad Zemljo z hitrostjo 500 vozlov. Na velikih višinah so močni vetrovi povsem običajni. Na najvišji višini 380FL, ki jo iz svojih modelov pošilja meteorološka služba, je nad Slovenijo povprečna jakost vetra skoraj 50 vozlov. Če bi zaradi tehničnih ali drugih težav kontrola ostala brez podatkov o vetrovih, bi lahko uporabili tabelo pridobljeno z letal.

Izračune podatkov za to delitev sem opravil na podatkih za mesece september, oktober in december 2009. To je čas zmanjšane prometa. Izbral ta čas, ker sem hotel preveriti, če je tudi v času zmanjšane prometa dovolj podatkov za dovolj kakovostne izračune. Poleg tega pa sem imel za ta čas na razpolago napovedi višinskih vetrov, s katerimi sem lahko svoje izračune primerjal.

Druga delitev ozračja je prilagojena meteorološki službi in deli ozračje na ploskve ločene po pritisku. Ploskve sem ločil na 10hPa. Meteorologi bi si želeli seveda natančnejše razdelitve, a v času manjšega prometa ni dovolj podatkov niti za razdelitev po 10hPa. Podobno, kot pri delitvi na višine, se letalo najprej uvrsti v eno izmed pritiskovih ploskev in meritve prispevajo podatke h Kalmanovem filtru te ploskve.

Izračune podatkov za to delitev sem opravil na podatkih za mesece junij, julij in avgust 2009, ker je količina prometa takrat dovolj velika in ker sem imel na voljo podatke s sond za primerjavo podatkov.

Da Kalmanov filter pripelje čimprej do najboljšega približka, je potrebno vnaprej nastaviti parametre. Predvsem je pomemben standardni odklon meritve. Zato sem iz podatkov, s katerimi sem razpolagal, izračunal standardne odklone vsakega razreda posebej in jih uporabil v ustreznih Kalmanovih filtrih.

4.3 Ovrednotenje pridobljenih rezultatov

Meteorološke napovedi vsebujejo temperaturo ter smer in jakost vetra za višine 20FL do 380FL. Na teh višinah sem lahko primerjal vrednosti pridobljene z letal s Kalmanovimi filtri in dejanske napovedi meteorologov. Napovedi se izdajajo vsakih dvanajst ur in so razdeljene na truirne razmake. Ob 00:00 UTC so torej izdelane napovedi za 00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00 in za 00:00 naslednji dan. Podobno so ob 12:00 UTC izdane

napovedi za 24 ur naprej. Za ure od 12:00 do 00:00 so bile napovedi izdane že prej, a so sedaj spremenjene glede na morebiten najnovejši razvoj vremena. Za vsako uro dobimo vsaj dve napovedi, a sem pri nalogi uporabil vedno tiste, ki so napovedovale vreme za krajši čas vnaprej, ker so verjetneje točnejše. Najbolj oddaljena napoved je torej bila oddaljena za 9 ur. Ob 00:00 je najbolj oddaljena napoved za 09:00. Za 12:00 pa je prispela že novejša napoved, ki je točnejša, saj je časovno manj oddaljena.

Napovedi prejete v kontroli zračnega prometa so podane za nekaj najbolj pomembnih točk. Za vsa letališča, kjer se izvaja priletna in odletna kontrola in za točko Dolsko (DOL), ki je ena glavnih navigacijskih točk zelo blizu središča zračnega prostora, ki ga nadzoruje Kontrola zračnega prometa Slovenije. Aplikacije za izračunavanje časov preletov letal v našem zračnem prostoru uporabljajo podatke o vetrovih nad točko Dolsko. Zato sem se tudi jaz odločil, da bom izračunaval vremenske razmere nad to točko in jih primerjal z napovedmi.

Nad majhnimi razlikami med napovedjo in izračuni Kalmanovih filtrov sem bil prijetno presenečen. Povprečen odklon temperature je bistveno pod 1°C kljub temu, da letala vračajo temperaturo natančno na četrto stopinjo in, da napovedi vsebujejo vrednosti zaokrožene na celo stopinjo. Smer vetra odstopa običajno le za nekaj stopinj. V redkih primerih več je razlika večja kot 5° . Še največje razlike so opazne v jakosti vetra na zelo majhnih in zelo velikih višinah. Na zelo majhnih višinah so opazni lokalni vplivi, na velikih višinah pa so jakosti vetra velike in so absolutno večje tudi napake. Vpliv pa ima tudi manjše število letal na velikih višinah in zaradi tega manjša količina kakovostnih podatkov. Na višinah med 100FL in 300FL razlika v jakosti vetra praktično ne preseže enega vozla, izven tega območja pa se povzpne tudi do 5 vozlov. Natančnejša analiza točnosti je opisana v naslednjem razdelku.

4.3.1 Prilagoditve Kalmanovega filtra

Žal nekatera letala nimajo umerjenih svojih senzorjev in vračajo napačne podatke. Lahko se celo zgodi, da letalo vrača podatek, ki je več velikostnih razredov oddaljen od dejanskih vrednosti. Ponavadi sem opazil, da je temperaturni senzor zamaknjen za nekaj stopinj. Tako letalo kvari celotno meritev in ga je potrebno izločiti. Da bi bile meritve čimbolj točne, sem moral najti metodo, s katero bi učinkovito izločil meritve, ki so napačne. Vrednosti, ki očitno odstopajo za nekaj velikostnih razredov ni težko najti in izločiti. Večji problem nastopi z meritvami, ki imajo manjšo napako, a dovolj veliko, da vplivajo na končni rezultat. Da bi učinkovito izločil take meritve, sem uvedel še

dodatne Kalmanove filtre za vsako letalo posebej. Ti filtri so beležili, za koliko meritve posameznega letala odstopajo od meritev, kamor prispevajo vsa letala. Če se izkaže, da po določenem številu meritev vrednosti posameznega letala odstopajo od tistega, kar vračajo ostala letala, se le to avtomatsko izloči iz nadaljnjih meritev, da ne bi kvarilo rezultata. Če meritve posameznega letala odstopajo malo v eno in malo v drugo smer, se bo Kalmanov filter umiril nekje na sredi in vrednost letala ne bo bistveno odstopala od meritve, h kateri prispevajo vsa letala skupaj. Če pa se vrednost letala vedno umiri nad ali pod vrednostjo ostalih letal je verjetno, da senzor na letalu ni umerjen in ga je bolje izločiti. Seveda ob predpostavki, da je dovolj ostalih meritev. To pomeni, da sta vsaj še dve drugi letali, ki prispevata k skupni vrednosti. Če sta letali le dve, ne moremo vedeti, katero vrača napačne vrednost in katero ne, ker bo dobljena vrednost iz Kalmanovega filtra približno na sredi med obema. V takem primeru ne moremo izločiti enega od njiju. Torej morajo biti za uspešno izločitev letala prisotna vsaj tri, da lahko izločimo tisto, ki odstopa od ostalih.

Upoštevati je potrebno tudi, da se letalo lahko spušča ali dviga. Tudi takemu letalu je potrebno ovrednotiti kakovost meritev. Tako letalo je potrebno na vsaki višini primerjati s tistimi letali, ki se na tej višini nahajajo. Tako ga primerjamo enkrat z enim in drugič z drugimi ostalimi letali. Če tudi v takem primeru vrednost razlike med tem letalom in ostalimi na isti višini konvergira k vrednosti različni od nič je jasno, da je potrebno tako letalo izločiti iz meritev.

Letalo sem v takih primerih izločil in njegovih meritev nisem več upošteval. Nisem pa popravljaj vrednosti, h katerim je to letalo prispevalo s svojimi napačnimi meritvami. Zaradi narave Kalmanovega filtra, ki ne hrani prejšnjih stanj, bi moral v ta namen dodatno hraniti vse meritve za nazaj in ponovno računati vrednosti ob izločanju posameznega letala. S tem bi se izgubil pomen in preprostost Kalmanovega filtra. Zato sem letalo le izločil, vrednost pa se je sama v nekaj korakih popravila, ker ni bilo več napačnih vnosov meritev, ali pa jih je bilo manj.

Napaka, ki sem jo dovolil je bila dvakratna vrednost standardnega odklona dobljenega iz vzorca meritev. Če je letalo imelo večjo napako kot dvakratni standardni odklon, sem ga iz meritev izločil. Zaradi tega, ker sem bil z rezultati Kalmanovega filtra zadovoljen, se nisem veliko ukvarjal s tem, da bi nastavljal drug prag za izločitev posameznega letala. Ta prag sem določil bolj po občutku in izkazal se je za učinkovitega.

Izločitev letala ne pomeni, da se izloči vse meritve. Če ima letal okvarjen senzor za temperaturo, še ne pomeni, da meritve vetra niso dovolj natančne.

Postopne izboljšave merilne metode

Brez izboljšav

Najprej sem brez kakršnihkoli pogojev in omejitev pognal Kalmanove filtre na podatkih. S tem sem bolj preveril delovanje filtrov in metode izločanja letal, ki vračajo napačne vrednosti. Že ti rezultati so bili kar dober približek pravih vrednosti, a je bilo še preveč meritev, ki bi jih lahko s preprostimi metodami izločil in končni rezultat izboljšal. Zato sem se lotil izboljšav.

Standardni odklon

Kalmanov filter potrebuje nekaj nastavitvev. Za večjo učinkovitost je pomembno, da nastavimo dejanski standardni odklon podatkov kot parameter filtra. Ker sem imel veliko količino zbranih podatkov sem iz njih pridobil standardne odklone za vsako višino posebej. Te odklone sem uporabil v filterih za višine. Poleg tega sem izračunal tudi standardne odklone meritev letal. Te sem uporabil za filtre, kjer sem beležil vrednosti posameznih letal.

S to prvo izboljšavo so se vrednosti že opazno približale tistim, ki so jih napovedali meteorologi.

Upoštevanje časa meritev

Letal je v času zmanjšanega prometa ponoči premalo, da bi lahko dobili dovolj meritev, ki bi nam dale dovolj podatkov za merodajno oceno. Tudi v času gostejšega prometa letala ne letajo na vseh možnih višinah. Filter deluje tako, da velja njegova vrednost za verodostojno, ko dobi dovolj meritev. Lahko se torej zgodi, da za določeno višino dobimo v enem časovnem obdobju dovolj meritev. Lahko se tudi zgodi, da dolgo časa ni več letal na isti višini in filter še vedno vrača zadnje dobljene vrednosti, čeprav so se lahko razmere spremenile.

Izboljšava dodaja k filtru čas zadnje meritve. Če je zadnja meritev preveč oddaljena, se vrednost filtra ne upošteva in se izpusti iz navpičnega profila ozračja kot manjkajoča vrednost.

Ko meritev nekaj časa ni in se ponovno pojavijo, so lahko drugačne. Filter potrebuje več časa, da se normalizira in umiri v tem primeru, ker upošteva stare meritve, ki niso več aktualne. Ta dejavnik je potrebno upoštevati in ob vsakem ponovnem pojavu podatkov po dolgem času filter ponovno inicializirati na začetne vrednosti. S tem sem se izognil daljšemu prilagajanju na morebitne spremenjene vrednosti in izničenje starih vrednosti, ki niso več aktualne.

Upoštevanje meritev v radiju 150km

Doseg radarja je približno 250 navtičnih milj. Letala na tej oddaljenosti so precej daleč od Slovenije in vremenske razmere tam so lahko precej drugačne kot nad nami.

Izločil sem letala, ki so bila več kot 150km oddaljena od točke Dolsko, ker sem podatke primerjal z napovedmi za to točko. Lažje bi bilo upoštevati oddaljenost od radarja, ker je to eden od podatkov, ki ga vrača radar. Če bi računal podatke za letališče Jožeta Pučnika, bi ta podatek lahko upošteval, saj je radar postavljen na tem letališču.

S to izboljšavo sem izločil vse meritve, ki so preveč oddaljene, in pridobil bolj homogene podatke.

Izločanje nezanesljivih meritev zaradi prevelikega naklona letal

Projekt AMDAR (WMO, 2003, [11]) je na podlagi izkušenj opredelil pravila navedena že v poglavju 3.2. Ta pravila predpisujejo, kakšni morajo biti pogoji, da so meritve dovolj zanesljive, da jih lahko upoštevamo. Izločil sem torej meritve opravljene med manevri letal, ki so bila nagnjena za več kot 5 kotnih stopinj. To je vzdolžni naklon letala ob zavojih.

Po kriterijih projekta AMDAR bi moral izločiti tudi meritve letal, ki se vzpenjajo ali spuščajo in njihov kot spuščanja/dviganja in kot nagiba oba presegata 3°.

Podatka o kotu spuščanja ali dviganja letala v radarskem odgovoru ni. Izračunati bi ga bilo potrebno iz relativne razlike med dvema zadnjima meritvama istega letala. Ker sem z doslej narejenimi metodami in izboljšavami dobil povsem zadovoljive rezultate, sem ocenil, da tega ne potrebujem. Edini kriterij je torej ostal vzdolžni nagib letala.

Ta izboljšava vpliva na meritve vetra. Pri meritvah temperature jih nisem upošteval.

Ovrednotenje podatkov pridobljenih z opisano metodo

Primerjava z napovedmi

Zgoraj opisane izboljšave so bistveno pripomogle k bolj točnim vrednostim. Povprečni odklon moči vetra se je izboljšal s 4,5 na 1,6 vozla. Ujemanje smeri vetra z meteorološko napovedjo se je spremenilo s 17 na 4 kotne stopinje. Pri temperaturi pa je bilo izboljšanje z napake 3,4°C na 1,5°C. Naštete vrednosti so za kontrolo zračnega prometa povsem zadovoljive tudi s stališča, da sem z izboljšavami izpustil napovedi, za katere meritev ne bi bila dovolj natančna. S

tem so nastale vrzeli, kjer podatkov ni, a tam letala običajno ne letajo in podatkov ne pogrešamo. Te vrzeli pa niso dobrodošle za meteorološke napovedi, ker je za te potrebe veliko bolj pomemben celoten prerez ozračja.

V tabeli 4.2 so prikazane povprečne razlike med napovedmi in meritvami z letal za obdobje, v katerem sem opravljal primerjave. Tu so prikazane le meritve, ki so zadostile vsem naštetim kriterijem iz zgoraj naštetih izboljšav. To pomeni, da za marsikatero višino vrednosti ni, ker podatkov ni bilo, ali pa so bili neustrezni.

Če pogledamo najprej hitrosti vetra vidimo, da so čisto pri tleh in visoko v zraku razlike večje. Vzrok za razlike pri tleh so predvsem lokalni vetrovi, ki so na nižjih višinah veliko bolj nestalni in odvisni od površja. Na velikih višinah so vetrovi večji in so zato absolutne napake večje. Lahko pa vidimo, da med višinama 100FL in 300FL napaka praktično ne preseže enega vozla.

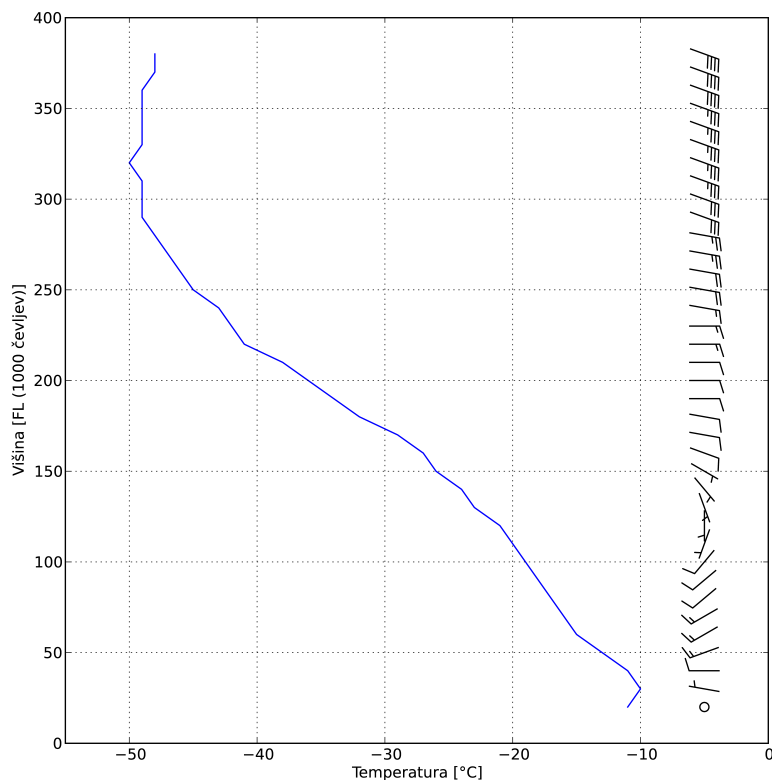
Druga vrednost, smer vetra je presenetljivo natančna predvsem zato, ker so meritve zelo razpršene in na prvi pogled videti bolj naključne. Standardni odklon je pri teh meritvah zelo velik in slike, ki kažejo razpršenosti meritev (3.15, 3.17, 3.19), prikazujejo precej enakomerno razpršenost, iz katere ne bi pričakoval tako točnih meritev. Razlika smeri vetra le na najnižji višini, kjer so lokalni vetrovi zares zelo izraziti, odstopa za več kot deset kotnih stopinj. Na vseh drugih višinah je razlika manjša. V glavnem je celo manjša od petih kotnih stopinj. Za izračune časov preletov letal skozi zračni prostor so dobljene vrednosti več kot dovolj natančne.

Temperature tudi kažejo dobro natančnost, čeprav je znano, da letalski termometri niso najbolj natančni. Glede na to, da vračajo vrednost temperature na četrto stopinje natančno in, da so v meteoroloških napovedih temperature zaokrožene na celo stopinjo, so rezultati, kjer temperaturna razlika redkokdaj preseže eno stopinjo, zelo dobri. Same temperature v kontroli zračnega prometa ne uporabljamo. Bo pa prišla prav meteorološkim službam, saj se je prikazana metoda zbiranja atmosferskih podatkov izkazala za precej natančno. Žal je podatkov običajno premalo, da bi bili podatki na voljo za celoten navpični prerez ozračja. Za meteorološke službe so najzanimivejši podatki iz nižjih plasti atmosfere, s pomočjo katerih bi lahko napovedovali ali odkrivali dele ozračja s turbulencami in podobnimi zračnimi nevšečnostmi, ki se jih letala raje izogibajo.

V tabeli so prikazane le povprečne razlike med napovedjo in izmerjeno ter povprečeno vrednostjo z letal. Kjer letala ne letajo, podatkov ni in tam razlika ni ocenjena. Lahko imamo popolne podatke, a če jih je zelo malo, nam to dosti ne pomaga.

Višina [FL]	Razlika hitrosti vetra [vozel]	Razlika smeri vetra [°]	Razlika temperature [°C]
380	-4,92	0,54	0,27
370	-2,79	4,41	-0,1
360	-4,31	1,61	0,04
350	-3,64	2,11	-0,17
340	-3,51	4,77	-0,73
330	-3	3,32	-0,65
320	-2,97	0,15	-1,27
310	-2,37	5,43	-0,59
300	-1,93	8,86	-1,42
290	-1,17	7,1	-0,14
280	-0,09	5,42	-0,84
270	1,11	7,02	-1,56
260	0,86	6,27	-0,88
250	0,68	5,42	-0,65
240	0,02	7,04	-0,06
230	0,8	7,1	-0,99
220	0,97	4,73	-0,78
210	0,63	4,43	-0,64
200	0,43	5,25	-0,58
190	0,17	4,68	-0,43
180	0,58	6,67	-1,63
170	-0,39	3,11	-0,56
160	-0,36	4,47	-0,69
150	-0,48	4,25	-0,77
140	-0,47	4,76	-0,11
130	-0,15	2,84	-0,29
120	0,15	0,77	-0,61
110	0,08	0,34	-0,12
100	0,67	0,84	0,18
90	0,96	-1,95	-0,05
80	1,6	-1,32	-0,15
70	2,49	2,14	-0,21
60	3,56	5,16	-0,11
50	3,21	2,09	0,22
40	2,65	-3,63	-0,01
30	1,56	-3,47	-0,08
20	-3,57	12,36	-1,37

Slika 4.2: Razlike med meritvami z letal in napovedmi meteorološke službe



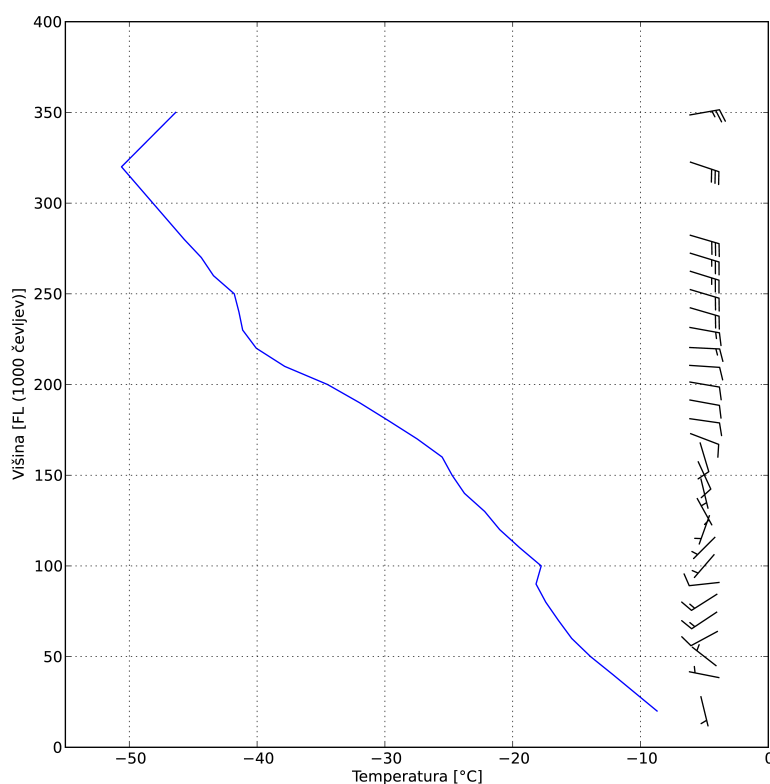
Slika 4.3: Napoved vetra in temperature nad točko Dolsko za 18.12.2009 ob 09:00UTC

Če upoštevamo, da prejemamo napoved višinskih vetrov v tabeli za višine od 20FL do 380FL, je to 37 vrednosti na teh višinah. Kalmanov filter za izračun tabele višinskih vetrov je v povprečju izračunal moč vetra za 17 višin, njegovo smer za 21 višin in temperaturo za 12 različnih višin. S tem povprečjem je upoštevan tudi nočni čas, ko je bila včasih tabela popolnoma prazna. V času večjega prometa je bilo stanje veliko boljše. V najboljšem primeru sem dobil meritev moči vetra za 36 višin, smeri prav za vse višine in temperature za 30 od 37 višin. Izkazalo se je tudi, da je vedno največ uporabnih vrednosti iz Kalmanovega filtra prišlo za nižje plasti ozračja in prav te si meteorologi najbolj želijo.



Sliki 4.3 in 4.4 prikazujeta primerjavo za dan, 18.12.2009 ob 09:00UTC. Na prvi sliki 4.3 je prikazana temperatura in vetrovi iz meteorološke napovedi.

Temperatura je prikazana z modro barvo. Ob desni strani grafa sta s puščicami označeni tudi smer in hitrost vetra.

Krogec (○) pomeni brezvetrje, kratek repek (—) 5 vozlov, dolg repek - zastavica (—) 10 vozlov, trikotnik (▲) 50 vozlov. Za poljubno hitrost vetra je potrebno sešteti našete osnovne enote, da prikažemo želeno jakost. Za hitrost 65 vozlov moramo, na primer, sešteti 50 (trikotnik), 10 (zastavico) in 5 vozlov (repek). Dobimo sliko s trikotnikom, zastavico in repkom ▲—, ki nam predstavlja moč vetra 65 vozlov. Smer vetra je predstavljena z nagibom puščice. Veter piha v smeri od repkov proti začetku puščice.



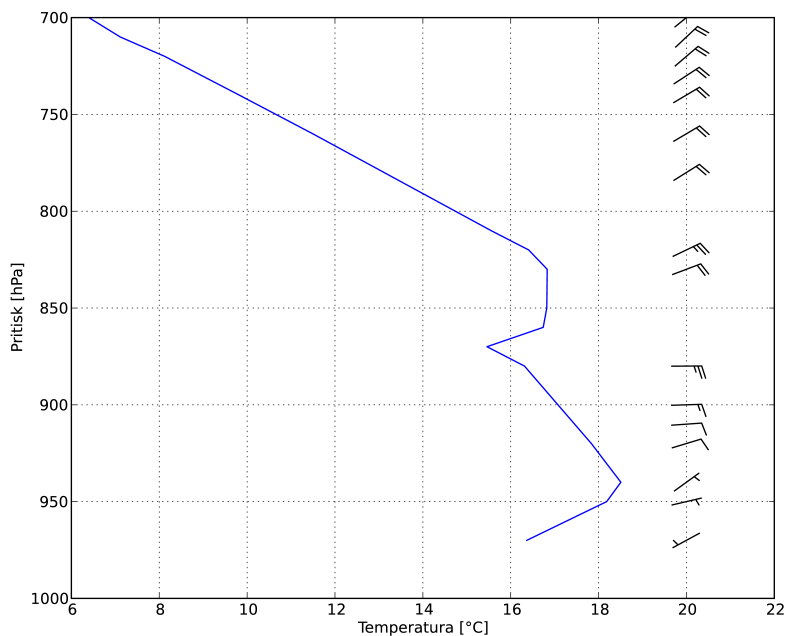
Slika 4.4: Meritev nad točko Dolsko za 18.12.2009 ob 09:00UTC

Primer:  prikazuje jugozahodni veter moči 15 vozlov in  predstavlja vzhodni veter 60 vozlov.

Druga slika 4.4 prikazuje vrednosti za isti dan in uro, ki so bile pridobljene z letal in povprečene s Kalmanovim filtrom. Vidimo, da sta grafa podobna. Pri temperaturi je težko iz slike razbrati, ali se razlikujejo za stopinjo Celzija ali več, lahko pa vidimo, da se temperatura z višino spreminja zelo podobno. Za vetrove pa lahko ugotovimo hitro iz slike, da so obrnjeni v približno isto smer in, da se jakosti v glavnem ujemajo.

Primerjava s sondažo

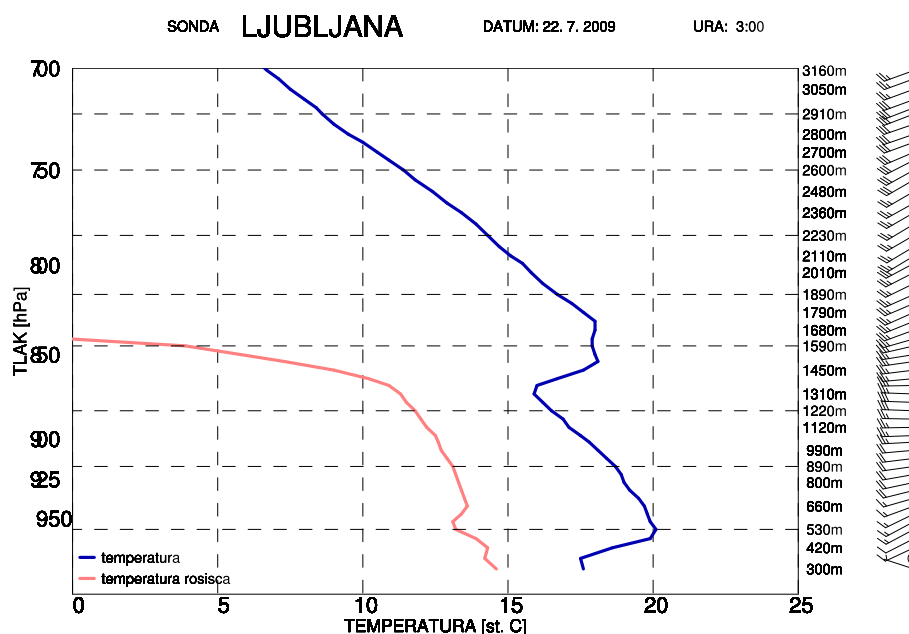
Lahko naredimo tudi primerjavo grafov izmerjenih in povprečenih vrednosti z letal z izmerjenimi vrednostmi sonde, ki je bila spuščena isti dan. Agencija Republike Slovenije za okolje izdeluje te grafe le do pritiskove ravnine 700hPa. To je približno do nadmorske višine 3000m. Ker temperatura strmo pada za večje višine izdelujejo drugačen graf, ki ima še mnogo drugih informacij in ga je težje primerjati. Zaradi velikih sprememb temperature na takem grafu so le te obrnjene za 45 stopinj. S tem se doseže, da se na grafu temperatura dviguje bolj ali manj navpično. Primer takega grafa lahko vidimo na sliki 4.7.



Slika 4.5: Meritev nad točko Dolsko za 22.7.2009 ob 06:00UTC do 700hPa

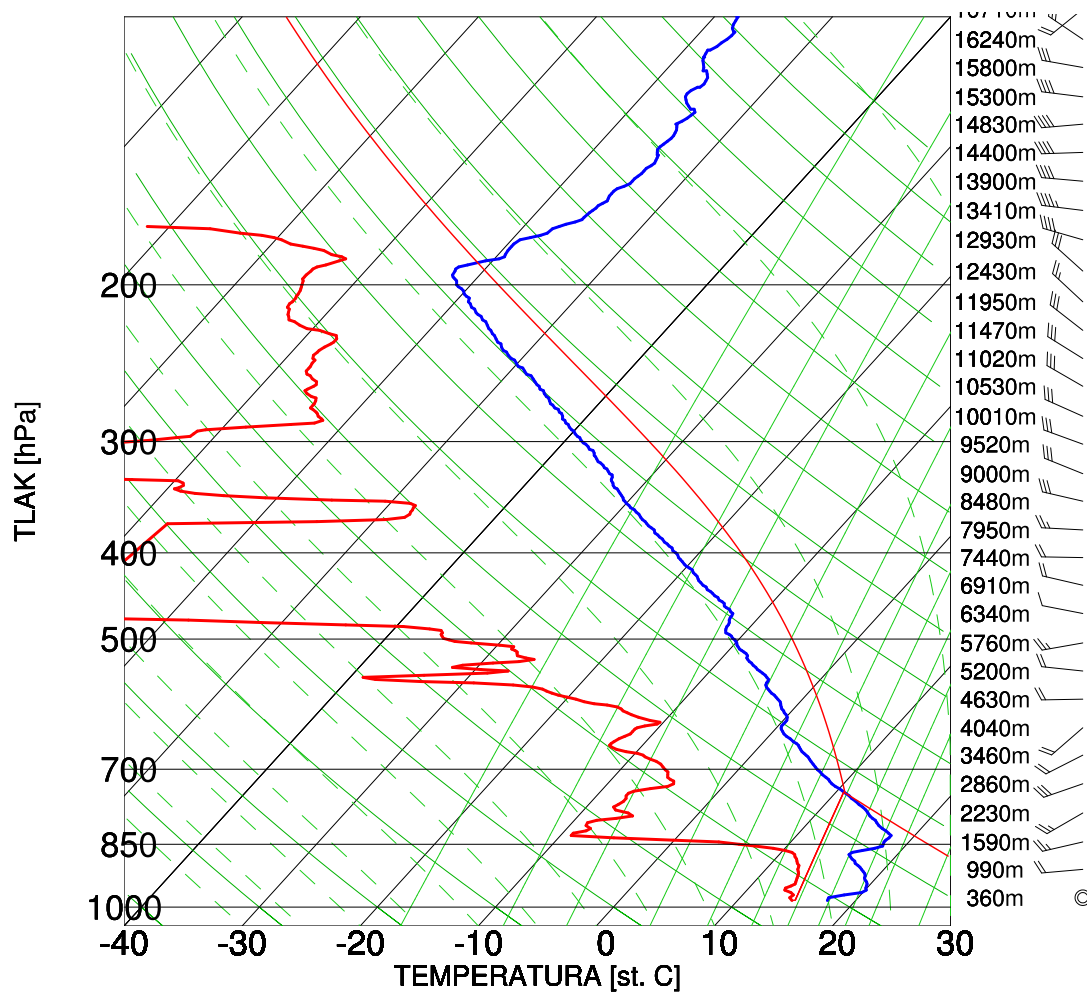
Odločil sem se, da ne bom primerjal grafov sondaže in meritev letal za celoten višinski profil, ker so na večjih višinah podatki z letal precej pomanjkljivi v primerjavi s sondažo. Ena sondaža vrne običajno 4000 do 6000 meritev, zato je graf sondaže precej bolj natančen in dobro pokrit na vseh višinah. Z letal običajno dobimo več podatkov za nižje višine in te bom primerjal na prikazanih slikah.

Primerjal sem do višine pritiskove ploskve 700hPa. Na slikah 4.5 in 4.6 lahko vidimo, da so temperature zelo podobne, vetrovi pa se razlikujejo. Vetrovi v nižjih plasteh ozračja so bolj nestalni in podvrženi lokalnim vplivom. Glede na to, da so bila letala drugače kot sonda in ob drugem času v tem dnevu, je razlika razumljiva.



Slika 4.6: Meritev sondaže na dan 22.7.2009 do višine 700hPa

Z zgornjih slik lahko razberemo, da meritve niso tako natančne kot meritve sondaže. Kljub temu pa so koristne, ker nam dajo dobro predstavbo o ozračju in so veliko bolj ažurne.



LJUBLJANA

POSTAJA: 14015
 DATUM: 22. 7. 2009
 URA: 3:00

K index: 21.3
 Sh index: 2.8

pritisk na kond. nivoju 744.0 hPa
 temperatura na kond. nivoju 10.8 C
 visina kond. nivoja 2610 m

T (C)	VISINA (m)
0	4280
-5	5120
-10	5780
-15	6660
-20	7270
-25	7880
-30	8440
-35	9150
-40	9750
-45	10370
-50	10920

— 2.5 m/s, 5 kt
 — 5 m/s, 10 kt

Slika 4.7: Prikaz sondaže za 22.7.2009

Poglavje 5

Zaključek

V nalogi sem razvil metodo, ki pridobi z letal prerez ozračja v višinah. Z avtomatskim izločanjem slabih meritev so podatki presenetljivo dobri in točni. Ob morebitnem izpadu podatkov iz meteoroloških napovedi je razvita metoda dobra za nadomestni prerez ozračja za kontrolo zračnega prometa, ki te podatke nujno potrebuje. Na višinah, kjer letala ne letajo, podatki manjkajo. Za kontrolo zračnega predmeta to ne predstavlja večjega problema, ker za manjkajoče višine podatkov ne potrebuje. Lahko se pojavi letalo, ki bo prvo letelo na določeni višini in zanj ne bo podatkov o višinskih vetrovih. Kontrolorji zračnega prometa imajo na voljo dovolj metod, da tako letalo uspešno vodijo skozi zračni prostor tudi brez teh podatkov. Takih letal ne bi bilo veliko v primerjavi s tistimi, ki bi te podatke imeli na voljo. Tabela višinskih vetrov, čeprav pomanjkljiva, bistveno pomaga k razbremenitvi kontrolorjev, saj zmanjša število letal, za katere ni možno dovolj natančno izračunati časa preleta.

Za potrebe meteoroloških napovedi zgornja metoda ni primerna. Z Agencijo Republike Slovenije za okolje se še dogovarjamo, v kakšni obliki bi bili podatki zanje najprimernejši. Posredovati vsako meritev z radarja bi bilo neustrezno, ker bi bilo teh podatkov preveč. Radar Charlie se zavrti v štirih sekundah, torej bi morali posredovati meritve za vsa letala vsake štiri sekunde. Veliko meritev bi bilo identičnih meritvam iz prejšnjega obrata radarja. Po podatkovni povezavi bi torej pošiljali mnogo podatkov, ki nimajo bistvene informacijske vrednosti.

Prva metoda za zmanjšanje količine podatkov predvideva simuliranje delovanja letalskega računalnika. Zbirala bi podatke z vsakega letala posebej, metoda povprečenja pa bi bila Kalmanov filter. Ob določenih časovnih intervalih bi poslala podatke v enakem formatu, kot jih pošiljajo letala po radijski

povezavi. S tem bi dosegli, da na strani procesiranja podatkov v projektu AMDAR ne bi bilo potrebne nobene spremembe v načinu obdelave podatkov. Drugačna bi bila le pot podatkov do cilja. S tem bi se količina pridobljenih podatkov lahko drastično povečala. Praktično vse države v Evropi imajo radarje Mode-S, ki so sposobni pridobivati vremenske podatke z letal. Če bi jih tudi posredovali naprej, bi lahko z njimi pridobili veliko več podatkov o atmosferi. To pa gotovo vodi k boljšemu poznavanju atmosfere in vremena ter posledično h kakovostnejšim vremenskim napovedim.

Drugi možen način uporabe podatkov v meteorološke namene je izdelava navpičnega profila ozračja, ki bi bil podoben poročilu izdelanemu s pomočjo radijske sonde. Radijske sonde se spuščajo iz Ljubljane v zrak le enkrat dnevno. Še to spuščanje je bolj namenjeno zbiranju podatkov o Ljubljanski kotlini. Za napovedovanje modelov višjih plasti ozračja so po besedah meteorologov že precej dobre meritve italijanske sonde iz Vidma in hrvaške sonde iz Zagreba. V nižjih plasteh pa je podatkov premalo in ena sonda na dan ne zadostuje. S podatki z letal bi lahko izdelali navpični profil ozračja večkrat dnevno bistveno ceneje. To sem v svoji nalogi že naredil, zdaj nas čaka le še to, da podatke posredujemo Agenciji Republike Slovenije za okolje in da jih oni v svojih modelih za napovedovanje vremena uporabijo. Iz dobljenih podatkov bi lahko učinkovito identificirali morebitne vremenske nepravilnosti, ki se jih letalci radi izogibajo. Kontrolorji zračnega prometa bi te podatke dobili in letala preusmerili v bolj mirne predele zračnega prostora. Tako bi bil krog sklenjen in letala bi dejansko imela še eno korist od podatkov, ki jih zbirajo in posredujejo.

Iskal sem podatke o tem, koliko držav se je že lotilo podobnih raziskav, in ugotovil, da je to področje na začetku raziskovanja. Na voljo je zelo malo analiz, ki se v glavnem ukvarjajo s kakovostjo podatkov. Nisem bil sposoben najti nobene raziskave, ki bi meteorološke podatke zajete z letal z radarji koristno uporabljala. V projektu AMDAR so izrazili veliko zanimanje za našo raziskavo in skupaj z Agencijo Republike Slovenije za okolje jo bomo predstavili na enem od forumov, ki jih redno organizirajo. Samo v Evropi je preko 200 radarjev Mode-S, ki so sposobni zajemati raznolike podatke od letal. Potencial, ki ga predstavlja raziskava, je velik in lahko prinese koristi na mnogih področjih.

Slike

2.1	Enolično določanje položaja letala	10
2.2	Razmerje med višino in kotom ψ	14
2.3	Geocentrični koordinatni sistem	16
2.4	Primer prikaza letal v programu Google Zemlja	22
2.5	Primer prikaza enega letala v programu Google Zemlja	23
3.1	Potovanje sond v testnem obdobju	31
3.2	Sonda in meritve z letal za 3.7.2009	32
3.3	Odvisnost temperature od časovne oddaljenosti	34
3.4	Standardni odklon temperature glede na časovno oddaljenost	35
3.5	Odvisnost temperature od geografske oddaljenosti	36
3.6	Standardni odklon temperature glede na geografsko oddaljenost	37
3.7	Odvisnost temperature od pritiska (višine)	38
3.8	Standardni odklon temperature glede na pritisk (višino)	39
3.9	Odvisnost hitrosti vetra od časovne oddaljenosti	40
3.10	Standardni odklon hitrosti vetra glede na časovno oddaljenost	41
3.11	Odvisnost hitrosti vetra od geografske oddaljenosti	42
3.12	Standardni odklon hitrosti vetra glede na geografsko oddaljenost	43
3.13	Odvisnost hitrosti vetra od pritiska (višine)	44
3.14	Standardni odklon hitrosti vetra glede na pritisk (višino)	45
3.15	Odvisnost smeri vetra od časovne oddaljenosti	46
3.16	Standardni odklon smeri vetra glede na časovno oddaljenost	47
3.17	Odvisnost smeri vetra od geografske oddaljenosti	48
3.18	Standardni odklon smeri vetra glede na geografsko oddaljenost	49
3.19	Odvisnost smeri vetra od pritiska (višine)	50
3.20	Standardni odklon smeri vetra glede na pritisk (višino)	51
4.1	Kalmanov algoritem	56
4.2	Razlike med meritvami z letal in napovedmi meteorološke službe	65

4.3	Napoved vetra in temperature nad točko Dolsko za 18.12.2009 ob 09:00UTC	66
4.4	Meritev nad točko Dolsko za 18.12.2009 ob 09:00UTC	67
4.5	Meritev nad točko Dolsko za 22.7.2009 ob 06:00UTC do 700hPa	68
4.6	Meritev sondaže na dan 22.7.2009 do višine 700hPa	69
4.7	Prikaz sondaže za 22.7.2009	70

Tabele

2.1	Količina meritev v testnem obdobju	20
-----	--	----

Literatura

- [1] Radiosonde Dostopno na:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Radiosonde>
- [2] WMO AMDAR Dostopno na:
<http://amdar.wmo.int>
- [3] ICAO, “Meteorological Service for International Air Navigation” *Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation*, International Civil Aviation Information, Sixteenth Edition, July 2007
- [4] ICAO, “Aeronautical Telecommunications” *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume III*, International Civil Aviation Information, First Edition of Volume III, July 1995
- [5] ICAO, “Aeronautical Telecommunications” *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume IV*, International Civil Aviation Information, Fourth Edition of Volume IV, July 2007
- [6] ICAO, “Manual of the ICAO Standard Atmosphere: extended to 80 kilometres (262 500 feet)“, *Doc 7488*, International Civil Aviation Information, Third Edition - 1993, ISBN 92-9194-004-6
- [7] Eurocontrol, “ASTERIX Part 5 Category 017 Appendix A Coordinate Transformation Algorithms for the Hand-Over of Targets Between PO-EMS Interrogators” Dostopno na:
<http://www.eurocontrol.int/asterix>
- [8] Eurocontrol, “Part 1 All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange (ASTERIX)“, Edition 1.3, November 2007, Dostopno na:
<http://www.eurocontrol.int/asterix/gallery/content/public/documents/pt1ed130.pdf>

- [9] Eurocontrol, “Category 048 Transmission of Monoradar Target Reports“, Edition 1.15, April 2007, Dostopno na:
<http://www.eurocontrol.int/asterix/gallery/content/public/documents/cat048p4ed116.pdf>
- [10] Eurocontrol, ASTERIX Standard, Dostopno na:
<http://www.eurocontrol.int/asterix>
- [11] World Meteorological Organization, “Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Reference Manual“, *WMO-No. 958*, Secretariat of the World Meteorological Organization - Geneva - Switzerland, 2003, ISBN 92-63-10958-3
- [12] World Meteorological Organization, “Aircraft Meteorological Data Relay - The International AMDAR Program“, *AMDAR Panel Flyer*, Dostopno na:
<http://amdar.wmo.int/Resources.html>
- [13] ICAO, “Manual of Aeronautical Meteorological Practice“, *Doc 8896*, International Civil Aviation Information, Eighth Edition - 2008, ISBN 978-92-9231-220-6
- [14] Google, KML Reference, Dostopno na:
<http://code.google.com/apis/kml/documentation/kmlreference.html>
- [15] B. Schwartz, S. G. Benjamin, “A Comparison of Temperature and Wind Measurements from ACARS-Equipped Aircraft and Rawinsondes“, *Weather and Forecasting*, Volume 10, Issue 3 (September 1995), Strani 528–544
- [16] W. R. Moninger, R. D. Mamros, P. M. Pauley, “Automated Meteorological Reports from Commercial Aircraft“, *Bulletin of the American Meteorological Society* Volume 84, Issue 2 (February 2003), Strani 203–216
- [17] B. A. Ballish, V. K. Kumar, “Systematic Differences in Aircraft and Radiosonde Temperatures“, *Bulletin of the American Meteorological Society* Volume 89, Issue 11 (November 2008), Strani 1689–1707
- [18] C. Drüe, W. Frey, A. Hoff, Th. Hauf, “Aircraft type-specific errors in AMDAR weather reports from commercial aircraft“, *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 134, Issue 630, 2008, Strani 229–239

- [19] Barometric Formula Dostopno na:
http://en.wikipedia.org/wiki/Barometric_formula
- [20] R.E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", *Transaction of the ASME—Journal of Basic Engineering*, Marec 1960, strani 35-45
- [21] G. Welch, G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter", Dostopno na:
<http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/kalmanIntro.html>
- [22] G. Welch, G. Bishop, The Kalman Filter Dostopno na:
<http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/>
- [23] B. Esme, Kalman Filter For Dummies Dostopno na:
[http://bilgin.esme.org/BitsBytes/KalmanFilterforDummies/
tabid/196/Default.aspx](http://bilgin.esme.org/BitsBytes/KalmanFilterforDummies/tabid/196/Default.aspx)
- [24] Vincenty's formulae Dostopno na:
http://en.wikipedia.org/wiki/Vincenty's_formulae
- [25] T. Vincenty, "Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations" *Survey Review XXIII (misprinted as XXII)*, 176, April 1975, Strani 88–93