REFERENTIECURSUS - VOOR IEDERE VOLWASSENE

Wat ADS-B is en hoe het werkt

Twaalf hoofdstukken. Er wordt geen voorkennis van luchtvaart of radio verondersteld; wiskunde van de middelbare school volstaat voor de uitgewerkte voorbeelden, en die kunt u overslaan zonder de draad kwijt te raken. Leestijd ongeveer 50 minuten.

Leren - https://radar.dataero.eu/nl/learning/course 2026-11-21

INHOUD

HOOFDSTUK 1 Het probleem: een lucht vol vliegtuigen die niemand kan zien
HOOFDSTUK 2 Voor ADS-B: vliegtuigen vinden met radar
HOOFDSTUK 3 Het idee: laat het vliegtuig het ons vertellen
HOOFDSTUK 4 Hoe het vliegtuig weet waar het is
HOOFDSTUK 5 Anatomie van een bericht
HOOFDSTUK 6 - NATUURKUNDE De golf: radio als onzichtbaar licht
HOOFDSTUK 7 - NATUURKUNDE Bereik: de kromming van de aarde en het verzwakken van het signaal
HOOFDSTUK 8 - NATUURKUNDE Antennes: een golf van 27 centimeter vangen
HOOFDSTUK 9 Ontvangen en decoderen
HOOFDSTUK 10 Van één ontvanger naar een kaart van een continent
HOOFDSTUK 11 Waarvoor het wordt gebruikt, en waar het tekortschiet
HOOFDSTUK 12 Een korte geschiedenis
Woordenlijst
VERDER Van theorie naar praktijk: bouw de ontvanger

HOOFDSTUK 1

Het probleem: een lucht vol vliegtuigen die niemand kan zien

Op een gewone werkdag doorkruisen zo'n 30.000 vluchten het Europese luchtruim. Een verkeersvliegtuig op kruishoogte beweegt met ongeveer 250 meter per seconde, of 900 km/h; twee vliegtuigen die op elkaar af vliegen, naderen elkaar met een halve kilometer per seconde. Een piloot die uit het raam kijkt, ziet hier vrijwel niets van: op 10.000 meter zijn andere vliegtuigen stipjes, en wolken verbergen de meeste toch al. De lucht is een driedimensionaal wegennet zonder geschilderde wegen, en het verkeer erop is zowel snel als onzichtbaar.

De luchtverkeersleiding bestaat om dat verkeer uit elkaar te houden. In principe zijn de regels eenvoudig: in gecontroleerd luchtruim worden vliegtuigen verticaal minstens 1.000 voet (ongeveer 300 meter) van elkaar gehouden, of horizontaal op een vastgestelde afstand, doorgaans 5 zeemijl (9,3 km) binnen radardekking en veel meer boven de oceanen. Om die regels toe te passen, moet een verkeersleider voortdurend en betrouwbaar de positie kennen van elk vliegtuig in zijn sector: niet waar het een minuut geleden was, maar waar het nu is, hoe hoog het vliegt en welke kant het op gaat. Het hele onderwerp van deze cursus is hoe die kennis wordt verkregen. Het vakwoord daarvoor is **surveillance**.

Een getal om te onthouden
Met 900 km/h legt een vliegtuig 15 km af in een minuut en 250 m in een seconde. Elke surveillancemethode die traag wordt bijgewerkt, of met een grote fout, laat de verkeersleider gissen over precies de afstanden die ertoe doen.

HOOFDSTUK 2

Voor ADS-B: vliegtuigen vinden met radar

Het eerste antwoord, ontwikkeld aan het eind van de jaren 1930 en tot wasdom gekomen tijdens de Tweede Wereldoorlog, was de **primaire radar**. Een grote draaiende antenne zendt een korte, zeer krachtige puls radio-energie uit. Wanneer de puls een vliegtuig raakt, wordt een heel klein deel ervan teruggekaatst. De radar meet de tijd tussen het vertrek van de puls en de terugkeer van de echo; omdat radio met de lichtsnelheid reist, 300.000 km/s, levert die tijd de afstand op. De richting waarin de antenne wees, geeft de peiling. Primaire radar is heerlijk onafhankelijk: het vliegtuig heeft er helemaal geen apparatuur voor nodig, en daarom gebruikt het leger hem nog steeds. Maar hij heeft echte zwakke punten. De echo van een ver vliegtuig is buitengewoon zwak, dus de zender moet enorm zijn. De echo zegt niets over wie het vliegtuig is of hoe hoog het vliegt. En de antenne heeft enkele seconden nodig voor een omwenteling, zodat elk vliegtuig maar eens per 4 tot 12 seconden wordt gezien, terwijl het intussen tot 3 km is verplaatst.

Het tweede antwoord, de **secundaire surveillanceradar** (SSR), maakte van het vliegtuig een deelnemer. Een grondstation zendt een vraag uit, een *ondervraging*, op 1030 MHz. Een kleine radio aan boord, de **transponder**, hoort de vraag en antwoordt op 1090 MHz met een eigen sterk signaal. Omdat het antwoord wordt uitgezonden in plaats van teruggekaatst, is het miljoenen keren sterker dan een radarecho, en omdat het door een computer wordt gemaakt, kan het informatie bevatten. In de oudste vorm (Mode A) bevat het antwoord een viercijferige identiteitscode die de verkeersleider toekent; in Mode C ook de hoogte van het vliegtuig. In de jaren 1980 kwam **Mode S** ("S" van selectief), waarin elke transponder een uniek 24-bitsadres heeft, afzonderlijk kan worden ondervraagd en kan antwoorden met databerichten van 56 of 112 bits. Onthoud dat getal, 1090 MHz, en dat woord, Mode S: ADS-B is rechtstreeks op allebei gebouwd.

De secundaire radar was een grote verbetering, maar deelt nog twee beperkingen met zijn voorganger. Het vliegtuig spreekt alleen als het iets gevraagd wordt, dus de grond heeft nog steeds een ondervragend station binnen bereik nodig, wat oceanen, woestijnen en bergketens uitsluit. En het station heeft nog steeds een draaiende antenne nodig om te weten uit welke richting het antwoord kwam, zodat elk vliegtuig nog steeds maar eens per omwenteling wordt gezien en het scherm van de verkeersleider nog steeds een stip toont die om de paar seconden verspringt in plaats van een vloeiend bewegend vliegtuig. Om dat te verbeteren, was iets fundamenteel anders nodig: een manier waarop het vliegtuig zijn positie meldt zonder dat het gevraagd wordt, en zonder dat de grond ook maar iets hoeft te meten.

HOOFDSTUK 3

Het idee: laat het vliegtuig het ons vertellen

Tegen de jaren 1990 waren twee technologieën zo ver gerijpt dat een andere aanpak mogelijk werd. Satellietnavigatie gaf elk passend uitgerust vliegtuig een nauwkeurige kennis van zijn eigen positie, veel beter dan een radar ooit vanaf de grond kon meten. En de Mode S-transponder leverde al een radio die databerichten kon verzenden op 1090 MHz. Breng die twee samen en de logica is onweerstaanbaar: in plaats van dat de grond zich inspant om te meten waar het vliegtuig is, laat het vliegtuig, dat het al weet, het gewoon zeggen, met regelmatige tussenpozen, aan iedereen. Dat is ADS-B, en de vier woorden van de naam zijn een precieze beschrijving.

Het is **automatisch**: niets zet een uitzending in gang. De transponder zendt volgens zijn eigen schema, ongeveer twee keer per seconde, of er nu een grondstation binnen bereik is of niet en of de piloot iets doet of niet; de piloot kan het tijdens de vlucht zelfs niet stoppen, behalve door de transponder uit te schakelen, wat verboden is. Het is **afhankelijk** (dependent): elk gegeven in het bericht komt van de eigen apparatuur van het vliegtuig, de positie van zijn satellietontvanger en de hoogte van zijn drukhoogtemeter, en de grond meet niets; die vertrouwt op wat hem verteld wordt. Het is **surveillance**: het doel is anderen te laten weten waar het vliegtuig is, voor de luchtverkeersleiding en voor vliegtuigen in de buurt, wat iets anders is dan navigatie, waarbij het vliegtuig zelf weet waar het is, en dan communicatie, het spreken met de piloot. En het is een **uitzending** (broadcast): het bericht heeft geen geadresseerde, geen ontvangstbevestiging en geen versleuteling, en iedereen met een ontvanger binnen bereik hoort precies hetzelfde, of het nu een verkeersleidingscentrum is, een ander verkeersvliegtuig of een school.

"Afhankelijk" is het woord dat ingenieurs zorgen baart, en het woord dat de meeste uitleg verdient. Radar doet een onafhankelijke meting: als de instrumenten van het vliegtuig verkeerd staan, maakt dat de radar niets uit. ADS-B erft elke fout van het eigen navigatiesysteem van het vliegtuig, en als dat systeem misleid wordt of uitvalt, wordt de verkeerde positie met dezelfde stelligheid uitgezonden. Daarom bevat elk ADS-B-bericht, naast de positie, een verklaring van hoeveel vertrouwen het vliegtuig in zijn eigen positie heeft (de integriteits- en nauwkeurigheidscategorieën die we in hoofdstuk 5 tegenkomen), en daarom is de radar niet uitgeschakeld.

"Uitzending" is het woord dat deze cursus mogelijk maakt. Omdat de berichten onversleuteld aan iedereen worden gestuurd, worden ze niet alleen door de luchtverkeersleiding gehoord, maar door elke ontvanger die op 1090 MHz is afgestemd, ook die u misschien op het dak van een school zet. Dezelfde eigenschap is de bron van de belangrijkste beperking van het systeem, die in hoofdstuk 11 aan bod komt: een bericht dat iedereen kan lezen, is ook een bericht dat iedereen kan vervalsen.

HOOFDSTUK 4

Hoe het vliegtuig weet waar het is

Alles in ADS-B berust erop dat het vliegtuig zijn eigen positie kent, dus dit hoofdstuk gaat over satellietnavigatie. De algemene term is **GNSS**, Global Navigation Satellite System; het Amerikaanse GPS is het bekendst, en het Europese Galileo, het Russische GLONASS en het Chinese BeiDou werken volgens hetzelfde principe. Elk systeem is een constellatie van zo'n 24 tot 30 satellieten die op ongeveer 20.000

km hoogte draaien, ver boven het vliegtuig, elk met een atoomklok die tot op enkele miljardsten van een seconde nauwkeurig is. Elke satelliet zendt voortdurend een radiosignaal uit dat in feite zegt: "dit is satelliet nummer N, mijn positie is zus-en-zo, en het tijdstip waarop ik dit verzond is precies T".

De ontvanger in het vliegtuig hoort dat signaal iets later, omdat radio tijd nodig heeft om te reizen: met 300.000 km/s duurt de 20.000 km vanaf de satelliet ongeveer 67 duizendsten van een seconde. De ontvanger vergelijkt het tijdstip in het bericht met het tijdstip van aankomst. Het verschil, vermenigvuldigd met de lichtsnelheid, is de afstand tot die satelliet. Eén afstand plaatst de ontvanger ergens op een bol rond die satelliet. Twee bollen snijden elkaar in een cirkel; drie bollen in twee punten, waarvan er meestal één absurd is (diep onder de grond of ver in de ruimte) en wordt verworpen. Drie satellieten zouden dus genoeg zijn, als de ontvanger een perfecte klok had.

Die heeft hij niet. Een atoomklok kost tienduizenden euro's en zou niet passen; de ontvanger heeft een goedkope kwartsklok die veel meer kan afwijken dan de vereiste tijdsprecisie. Nu komt het elegante deel. De ontvanger behandelt zijn eigen klokfout als een vierde onbekende, naast zijn drie positiecoördinaten, en luistert naar een vierde satelliet. Vier vergelijkingen, vier onbekenden: de ontvanger berekent zijn positie en corrigeert, als bijproduct, zijn eigen klok tot op enkele tientallen nanoseconden. Daarom heeft een satellietontvanger minstens vier satellieten in zicht nodig, en daarom is elke GNSS-ontvanger terloops ook een van de nauwkeurigste klokken in het gebouw.

Het loont om bij de ordes van grootte stil te staan, want ze verklaren waarom satellietnavigatie eigenlijk een oefening in tijdmeting is, met de meetkunde als bijzaak. Licht legt 30 centimeter af in een nanoseconde en 300 meter in een microseconde, dus een tijdsfout van een miljoenste seconde wordt een positiefout van 300 meter, en de nauwkeurigheid van enkele meters van een moderne ontvanger komt overeen met tijdmeting op het niveau van ongeveer tien nanoseconden. Neem een concreet geval. Een satelliet geeft een signaal het tijdstip 12:00:00,000 000 000 mee; de ontvanger van het vliegtuig hoort het om 12:00:00,070 000 000. De reistijd is 0,070 s, dus de afstand is 0,070 x 300.000 km/s = 21.000 km. Was de eigen klok van de ontvanger maar één microseconde voorgelopen, dan had hij 21.000,3 km berekend, 300 meter te ver, en dezelfde fout zou ook in de afstand tot elke andere satelliet zijn geslopen. Die gedeelde fout is precies wat de vierde satelliet blootlegt en wegwerkt.

Twee hoogtes, niet één

Satellieten geven een hoogte boven het wiskundige oppervlak van de aarde, een *geometrische* hoogte. Toch is de hoogte die een vliegtuig voor de luchtverkeersleiding uitzendt niet die hoogte. Het is de **barometrische hoogte**, afgeleid van de luchtdruk buiten het vliegtuig, gemeten via een kleine opening in de romp, de statische drukopening. De luchtdruk neemt op een bekende manier af met de hoogte (ongeveer 1 hPa per 8 meter dicht bij de grond, hoger trager), en elke hoogtemeter ter wereld zet druk om in hoogte met dezelfde standaardatmosfeer, met 1013,25 hPa op zeeniveau als referentie. Op een dag met ongewone luchtdruk zit de barometrische hoogte van elk vliegtuig er evenveel naast, en dat is precies de bedoeling: voor de separatie telt niet de werkelijke hoogte boven zee, maar dat twee vliegtuigen die allebei "vliegniveau 350" aflezen werkelijk 300 meter verwijderd zijn van een vliegtuig dat "vliegniveau 340" afleest. ADS-B zendt de barometrische hoogte uit in zijn positieberichten, in stappen van 25 voet (7,6 m), en zendt apart het verschil tussen die hoogte en de satelliethoogte uit, zodat een ontvanger allebei kan reconstrueren.

HOOFDSTUK 5

Anatomie van een bericht

Het ADS-B-bericht dat verkeersvliegtuigen wereldwijd gebruiken, is een Mode S-uitzending die de **extended squitter** heet; "squitter" is oud radarjargon voor een uitzending die spontaan wordt verzonden in plaats van als antwoord, en "extended" (uitgebreid) omdat hij met 112 bits twee keer zo lang is als het oorspronkelijke Mode S-antwoord. Ingenieurs schrijven "1090ES" voor "1090 MHz extended squitter". Elke uitzending duurt in totaal 120 microseconden: een *preambule* van 8 microseconden, een vast patroon van vier pulsen waarmee een ontvanger het begin van een bericht herkent en zijn klok synchroniseert, gevolgd door 112 databits met één bit per microseconde.

Hoe een bit wordt verzonden: pulspositiemodulatie

Elk bitvak van één microseconde wordt in twee helften verdeeld. Een puls radio-energie in de eerste helft en stilte in de tweede betekent 1; stilte en dan een puls betekent 0. Er is dus precies één puls per bit, wat de data ook zijn, en de ontvanger hoeft alleen te beslissen welke helft van elk vak luider was. Dit schema, pulspositiemodulatie, is bestand tegen het soort ruis en fading dat een signaal ondergaat op weg van een transponder naar een verre antenne, en het is goedkoop te decoderen.

Vier bits in pulspositiemodulatie: 1, 0, 1, 1



Elk vak duurt 1 microseconde. Puls in de eerste helft: 1. Puls in de tweede helft: 0.

De 112 bits

DF	CA	ICAO-adres	ME - de inhoud	PI
5 bits	3 bits	24 bits	56 bits	24 bits
downlinkformaat	capaciteit	unieke identiteit van het vliegtuig	positie, hoogte, snelheid, roepnaam of status, afhankelijk van de typecode in de eerste 5 bits	foutcontrole (CRC)

De eerste vijf bits, het downlinkformaat, zeggen wat voor Mode S-bericht dit is; de waarde 17 betekent "ADS-B van een Mode S-transponder". Het 24-bits **ICAO-adres** is de vaste identiteit van het vliegtuig, toegekend bij de registratie: er zijn 2 tot de macht 24, oftewel 16.777.216, mogelijke adressen, die de ICAO, de burgerluchtvaartorganisatie van de VN, in blokken aan staten toewijst. Belgische vliegtuigen hebben bijvoorbeeld adressen van 448000 tot 44FFFF in hexadecimale notatie. Anders dan de viercijferige code van het oude Mode A verandert dit adres nooit en wordt het nooit gedeeld, zodat een ontvanger vanaf het allereerste bericht zeker weet welk vliegtuig hij hoort.

Het 56-bits **ME**-veld is de eigenlijke inhoud, en de eerste vijf bits ervan, de *typecode*, zeggen wat de rest betekent. Typecodes 1 tot 4 bevatten de roepnaam van het vliegtuig, zoals BEL1234 of RYR7KL, als acht tekens van zes bits. Codes 9 tot 18 bevatten een positie in de lucht met barometrische hoogte; 20 tot 22 hetzelfde met satelliethoogte. Code 19 bevat de snelheid: de grondsnelheid ontbonden in een oost-west- en een noord-zuidcomponent, de verticale snelheid en het verschil tussen barometrische en

satelliethoogte. Codes 28, 29 en 31 bevatten status: noodcodes, de geselecteerde hoogte en de integriteits- en nauwkeurigheidscategorieën die zeggen hoeveel vertrouwen de uitgezonden positie verdient (een "NIC" van 8 bijvoorbeeld belooft dat de werkelijke positie met grote waarschijnlijkheid binnen 185 m van de gemelde ligt).

De laatste 24 bits zijn een **cyclische redundantiecontrole**, een getal dat uit de voorgaande 88 bits wordt berekend met een vaste polynoomdeling. De ontvanger herhaalt de berekening op de bits die hij heeft gedecodeerd; als de uitkomst niet klopt, is onderweg minstens één bit beschadigd en wordt het bericht verworpen. Omdat een puls van één microseconde gemakkelijk verloren gaat door ruis of door een overlappend bericht van een ander vliegtuig, is het deze controle die verminkte posities van het scherm van de verkeersleider houdt. Een echt bericht, zoals een ontvanger het zou vastleggen, ziet er zo uit:

> `8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098`
>
> 8D: downlinkformaat 17, capaciteit 5. 4840D6: ICAO-adres, een Nederlands vliegtuig. 20...: typecode 4, een identificatiebericht, dat gedecodeerd de roepnaam KLM1023 oplevert. 576098: de foutcontrole.

De aarde in 34 bits passen

Een positiebericht heeft maar 17 bits voor de breedtegraad en 17 voor de lengtegraad. Dat zijn 131.072 stappen rond de hele aardbol, elk ongeveer 300 m aan de evenaar: lang niet goed genoeg. ADS-B lost dit op met **compact position reporting** (compacte positiemelding). De aarde wordt in zones verdeeld; de 17 bits geven een zeer precieze positie (tot op ongeveer 5 m) binnen een zone, maar niet welke zone. Het vliegtuig wisselt af tussen twee licht verschillende zoneroosters, "even" en "oneven" berichten, en een ontvanger die van elk één heeft gehoord, kan de zone eenduidig bepalen. Zodra dat gelukt is, volstaat één bericht om het vliegtuig te volgen, want het kan in een halve seconde nauwelijks naar een andere zone zijn gesprongen. Het is een handige truc die de bruikbare precisie verdubbelt zonder één bit extra.

Hoe vaak

Een transponder in de lucht zendt twee keer per seconde een positiebericht, twee keer per seconde een snelheidsbericht en om de vijf seconden zijn roepnaam, plus statusberichten met langere tussenpozen, in totaal dus zo'n vier tot vijf extended squitters per seconde. Elk duurt 120 microseconden; de transponder zendt in werkelijkheid ruim minder dan een duizendste van de tijd ADS-B uit. De rest van de seconde luistert hij naar, en antwoordt hij op, radarondervragingen op 1030 MHz en de vragen van de botsingsvermijdingssystemen van andere vliegtuigen.

HOOFDSTUK 6 - NATUURKUNDE

De golf: radio als onzichtbaar licht

Het bericht verlaat het vliegtuig als een **radiogolf**, en het allernuttigste idee in deze cursus is dat een radiogolf en een lichtstraal hetzelfde zijn. Beide zijn elektromagnetische golven: een patroon van elektrische en magnetische velden die samen trillen en zich met de lichtsnelheid, c, door de ruimte voortplanten, 299.792.458 meter per seconde, of afgerond 300.000 km/s. Wat een radiogolf onderscheidt van groen licht, van de röntgenstraling in een ziekenhuis of van de microgolven in een keukenoven, is alleen hoe snel de velden trillen: de **frequentie**, f, gemeten in hertz (trillingen per seconde).

Omdat de golf met een vaste snelheid reist, legt de frequentie de afstand vast tussen de ene top en de volgende, de **golflengte**, lambda. In één seconde legt de golf c meter af en voltooit hij f trillingen, dus elke trilling beslaat c / f meter:

$$c = f \times \lambda$$

Voor ADS-B: lambda = 300.000.000 / 1.090.000.000 = 0,275 m. De golf tussen het vliegtuig en uw antenne heeft toppen op 27,5 cm van elkaar, ongeveer de lengte van een schoollat.

Golf	Frequentie	Golflengte	Opmerking
FM-radio-omroep	100 MHz	3 m	Autoantennes zijn een fractie hiervan
ADS-B / Mode S	1090 MHz	27,5 cm	Ook gebruikt voor de antwoorden van radartransponders
Mobiele telefoon (4G-band)	1800 MHz	17 cm	Een naaste buur in het spectrum
Wifi, magnetron	2450 MHz	12 cm	Zelfde frequentie, enorm verschillend vermogen
Zichtbaar groen licht	560.000.000 MHz	0,000 54 mm	Een half miljoen keer hogere frequentie

Twee gevolgen zijn van belang voor alles wat volgt. Ten eerste: omdat de golf licht is, plant hij zich in rechte lijnen voort tenzij iets hem afbuigt of tegenhoudt, en gaat hij niet door de aarde heen. Dat bepaalt het bereik van het systeem, het onderwerp van hoofdstuk 7. Ten tweede: omdat de golflengte 27,5 cm is, hebben de metalen structuren die er het sterkst op reageren, antennes, ongeveer die grootte, het onderwerp van hoofdstuk 8.

Waarom radio geen geluid is

De meest voorkomende verwarring, bij volwassenen evengoed als bij kinderen, is die tussen radio en geluid, waarschijnlijk omdat een "radio" een kastje is dat geluid maakt. Het zijn twee totaal verschillende verschijnselen. Geluid is een drukgolf in de lucht, een keten van moleculen die tegen hun buren duwen; het heeft een materiaal nodig om zich voort te planten, beweegt met 340 m/s en kan geen vacuüm oversteken. Radio heeft niets nodig: het steekt het vacuüm tussen een satelliet en het vliegtuig over en beweegt bijna een miljoen keer sneller. Het motorgeluid van het vliegtuig en zijn ADS-B-bericht vertrekken op hetzelfde moment; het bericht komt bij een ontvanger op 20 km afstand aan na 67 microseconden, het geluid pas een volle minuut later.

Waarom 1090 MHz

De frequentie is een erfenis. Internationale afspraken uit de jaren 1950 reserveerden de band van 960 tot 1215 MHz voor luchtvaartradionavigatie, en 1090 MHz werd de antwoordfrequentie van de transponders van de secundaire radar. Toen ADS-B werd ontworpen, was het hergebruiken van de transponder die al in elk verkeersvliegtuig zat veel goedkoper dan het inbouwen van een nieuwe radio, en dus werd ADS-B gewoon nog iets wat de Mode S-transponder op 1090 MHz zegt. In de Verenigde Staten mogen kleinere vliegtuigen die onder ongeveer 5.500 m vliegen in plaats daarvan een tweede systeem gebruiken, UAT op 978 MHz, en daarom luisteren ontvangers daar vaak op allebei.

HOOFDSTUK 7 - NATUURKUNDE

Bereik: de kromming van de aarde en het verzwakken van het signaal

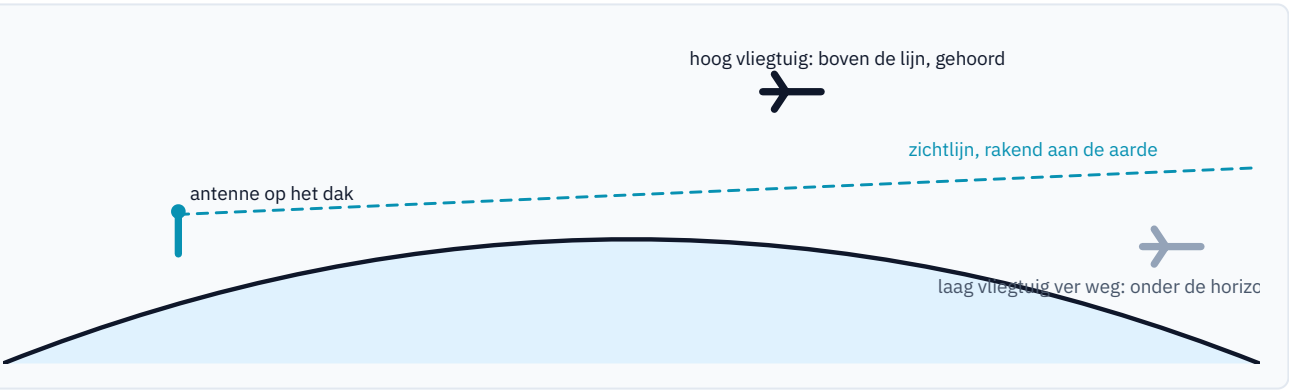
Een transponder zendt met een piekvermogen van enkele honderden watt. Hoe ver weg kan zo'n signaal worden gehoord? Twee heel verschillende dingen beperken dat, en het loont om ze uit elkaar te houden: de meetkunde, die een harde grens trekt, en het vermogen, dat een zachte grens trekt.

De radiohorizon

Op 1090 MHz gedraagt radio zich als licht: het plant zich in rechte lijnen voort en buigt niet om de aarde heen. Een antenne op de grond kan een vliegtuig dus alleen horen zolang er tussen beide een rechte lijn is die niet door de grond gaat. Voor een waarnemer aan het oppervlak ligt de horizon waar die lijn de aarde net raakt. Hoe hoger het vliegtuig, hoe verder dat raakpunt ligt; hoe hoger de antenne, hoe verder nog. De meetkunde van een raaklijn aan een bol geeft een eenvoudig resultaat: de afstand tot de horizon in kilometer is ongeveer 3,57 keer de vierkantswortel van de hoogte in meter. De atmosfeer buigt radio een beetje naar beneden, wat de horizon met zo'n 15 procent oprekt, en daarom gebruiken ingenieurs 4,12:

```
d (km) = 4.12 x ( sqrt(h aircraft) + sqrt(h antenna) )   heights in metres
```

Vliegtuig op 11.000 m, antenne op een dak van 20 m: 4,12 x (104,9 + 4,5) = 451 km. Vliegtuig op 1.000 m, zelfde dak: 4,12 x (31,6 + 4,5) = 149 km. Vliegtuig op de grond op 15 km afstand: helemaal niet gehoord, tenzij het land ertussen vlak en vrij is.



Dit verklaart de typische vorm van de dekking van een ontvanger: een cirkel van 400 km of meer voor hoogvliegend verkeer, die krimpt tot enkele tientallen kilometers voor vliegtuigen in de nadering, en bijna niets voor vliegtuigen op de grond, behalve op de luchthaven naast de deur. Het verklaart ook waarom de hoogte van de ontvanger veel belangrijker is dan de kwaliteit ervan, en waarom een heuvel, een hoog gebouw of zelfs de eigen vleugel van het vliegtuig, wanneer het van u weg helt, een signaal ogenblikkelijk kan afsnijden.

De kwadratenwet

Binnen de horizon wordt het signaal zwakker met de afstand. Een transponderantenne straalt in alle horizontale richtingen uit, dus het vermogen verspreidt zich over een steeds grotere bol. De oppervlakte van een bol groeit met het kwadraat van de straal, dus het vermogen dat op een antenne van vaste grootte valt, neemt af met het kwadraat van de afstand: twee keer zo ver, een kwart van het vermogen;

tien keer zo ver, een honderdste. Ingenieurs drukken dit uit als een *padverlies* in decibel, en voor 1090 MHz over 400 km komt dat op ongeveer 145 dB, wat betekent dat het ontvangen vermogen ongeveer 10 tot de macht 14,5 keer kleiner is dan het uitgezonden vermogen. Een puls van 250 watt komt aan als ruwweg een tiende van een miljardste milliwatt. Een goede ontvanger kan dat nog net detecteren, en daarom vallen de geometrische horizon en de vermogensgrens toevallig samen op enkele honderden kilometers: het systeem is zo ontworpen.

De twee grenzen werken op een manier samen die het begrijpen waard is. Binnen de horizon worden een sterk signaal van een vliegtuig dichtbij en een zwak signaal van een ver vliegtuig allebei perfect gedecodeerd, omdat het pulspositieschema uit hoofdstuk 5 alleen vraagt welke helft van elk bitvak luider was, niet hoe luid. Het signaal wordt niet geleidelijk onbruikbaar naarmate het vliegtuig zich verwijdert; het blijft decodeerbaar totdat, ergens bij de horizon, ofwel de meetkunde het afsnijdt ofwel de ruis in de ontvanger het uiteindelijk overstemt, en het spoor stopt. Daarom hebben dekkingskaarten scherpe randen, en daarom zijn de verste vliegtuigen die een ontvanger hoort bijna altijd de hoogste.

HOOFDSTUK 8 - NATUURKUNDE

Antennes: een golf van 27 centimeter vangen

Een antenne is een stuk geleider dat zo is gevormd dat een voorbijkomende elektromagnetische golf de elektronen erin in de maat laat bewegen, wat een heel kleine wisselstroom oplevert die een ontvanger kan versterken. In de zender gebeurt het omgekeerde: een wisselstroom in de antenne van het vliegtuig zet de golf in gang. Het rendement van deze uitwisseling hangt af van de grootte van de geleider ten opzichte van de golflengte. Een rechte draad reageert het sterkst, hij *resoneert*, wanneer hij een halve golflengte lang is, zodat de stroom die er heen en weer door klotst precies past bij de trilling van de golf, zoals een kinderschommel die op zijn natuurlijke ritme wordt aangeduwd. Voor 1090 MHz is een halve golflengte 13,75 cm.

De meest gebruikte praktische vorm is de **kwartgolfmonopool**: een verticale staaf van een kwart golflengte, 6,9 cm, die op een geleidend oppervlak staat, het *grondvlak*. Het grondvlak werkt als een spiegel, zodat de staaf en zijn spiegelbeeld samen werken als een halvegolfantenne. Daarom is de ADS-B-antenne van een vliegtuig een stompe vin van enkele centimeters hoog op de romp, waarbij de romp het grondvlak is, en daarom is de antenne van een hobbyist een kort draadje op een blikken deksel. Een draad van de verkeerde lengte werkt nog wel, maar veel minder goed: het "metalen oor" is afgestemd.

Drie andere eigenschappen van de antenne volgen uit de natuurkunde, en elk heeft een zichtbaar gevolg. De eerste is de **polarisatie**. Het elektrische veld van een elektromagnetische golf trilt in een bepaalde richting loodrecht op de voortplantingsrichting, en een antenne reageert alleen op de component van het veld langs haar eigen lengte. Vliegtuigantennes zijn verticaal gemonteerd, dus de ADS-B-golf komt verticaal gepolariseerd aan, en een ontvangstantenne moet ook verticaal staan; op haar zij gelegd hoort ze bijna niets, zoals een touwgolf die op en neer wordt geschud wordt tegengehouden door een horizontale spleet. De tweede is het **stralingsdiagram**. Een verticale antenne is het gevoeligst in de richting van de horizon en helemaal niet langs haar eigen as, zodat haar gevoeligheid in drie dimensies de vorm heeft van een donut met de antenne door het gat. Ontvangers horen daardoor routinematig zonder moeite vliegtuigen op 300 km afstand en verliezen er een die recht overvliegt een paar seconden, iets om op te letten op elke live kaart. Door meerdere resonerende elementen boven elkaar te stapelen, wordt de

donut platter gedrukt, waardoor de gevoeligheid zich concentreert op de horizon, waar de verre vliegtuigen zijn, ten koste van de lucht recht boven; dat is wat met de **versterking** (gain) van een antenne wordt bedoeld, en het is altijd een herverdeling van gevoeligheid, nooit een creatie ervan.

De derde betreft wat er tussen de antenne en de ontvanger zit. De antenne vangt niet alleen 1090 MHz op, maar elk signaal in de omgeving, ook uitzendingen van mobiele telefoons enkele honderden megahertz verderop die veel sterker zijn, dus komt eerst een filter dat alleen de luchtvaartband doorlaat. Het signaal moet dan door een kabel, en op 1090 MHz verliest een coaxkabel ruwweg de helft van het signaal per tien meter; de oplossing is een ruisarme versterker bij de antenne, vóór de kabel, zodat het signaal sterk genoeg is om de reis te overleven, in plaats van bij de ontvanger, waar versterken ook de ruis van de kabel zou versterken samen met wat er van het signaal over is. Het zijn details, maar het zijn de details die bepalen of een ontvanger op een schooldak de vliegtuigen aan de horizon hoort of alleen die dichtbij.

HOOFDSTUK 9

Ontvangen en decoderen

Tussen de antenne en een stip op een kaart ligt een keten van vijf stappen. De antenne zet de voorbijkomende golf om in een wisselstroom van enkele microvolts. Een filter en een ruisarme versterker houden de band van 1090 MHz over, weren al het andere en versterken het signaal duizendvoudig. Een softwaregedefinieerde radio stemt af op de frequentie en bemonstert het signaal twee miljoen keer per seconde, waardoor het een stroom getallen wordt. Een decoder zoekt in die stroom naar het preambulepatroon, leest de 112 bits uit, controleert de pariteit en decodeert de velden. En een tracker verzamelt de berichten van elk vliegtuig in één doorlopend bijgewerkt record: een positie, een koers, een label.

De opmerkelijke stap is de derde. Tot ongeveer 2010 had je voor het decoderen van 1090 MHz speciaal gebouwde hardware van duizenden euro's nodig. Toen ontdekten hobbyisten dat een USB-tv-tuner van 20 euro een chip bevatte die je kon laten afstemmen op elke frequentie en die het ruwe signaal aan een computer kon doorgeven. Deze **softwaregedefinieerde radio** maakt van het radioprobleem een programmeerprobleem: een laptop of een Raspberry Pi krijgt een stroom van twee miljoen getallen per seconde die de signaalsterkte beschrijven, en gratis software zoekt naar het preambulepatroon, meet welke helft van elk microsecondevak luider is, stelt 112 bits samen, berekent de CRC en drukt de velden af. Het ontvangerproject in de kit voor het secundair onderwijs is precies deze keten, en een school kan het voor minder dan 100 euro bouwen.

In de trackerstap wordt de stroom berichten kennis. Eén positiebericht is, zoals gezegd, dubbelzinnig tot een even en een oneven bericht aan elkaar gekoppeld zijn. De snelheid komt los van de positie binnen, de roepnaam weer apart, en de tracker naait ze aan elkaar via het ICAO-adres, verwerpt alles wat niet door de foutcontrole komt en bewaart de laatst bekende toestand van elk vliegtuig. Als er een minuut lang geen bericht binnenkomt, meestal omdat het vliegtuig onder de horizon is gezakt, vervalt het spoor.

HOOFDSTUK 10

Van één ontvanger naar een kaart van een continent

Eén ontvanger hoort een cirkel van de lucht van enkele honderden kilometers doorsnee. Een kaart van Europa heeft er honderden nodig, en de nuttige staan niet in steden maar verspreid: aan de kust, in dalen, op eilanden, overal waar de cirkel van een andere ontvanger niet komt. Elke ontvanger stuurt zijn gedecodeerde berichten, elk voorzien van het tijdstip van aankomst, via internet naar een centrale dienst. Die dienst *aggregeert*: hetzelfde bericht van een hoog vliegtuig komt doorgaans van tien of twintig ontvangers tegelijk binnen, en de duplicaten moeten worden herkend en samengevoegd. Hij controleert ook: een positie die niet strookt met het beeld dat alle naburige ontvangers van hetzelfde vliegtuig hebben, is waarschijnlijk een decodeerfout of een defecte transponder, en wordt gemarkeerd of verworpen.

Multilateratie: vliegtuigen vinden die niet zeggen waar ze zijn

Niet elk vliegtuig zendt een positie uit. Oudere transponders antwoorden de radar met identiteit en hoogte, maar hebben geen satellietinvoer; sommige vliegtuigen zenden er bewust geen. Toch bereiken hun uitzendingen op 1090 MHz de grond, en een netwerk kan ze lokaliseren door de satellietnavigatie binnenstebuiten te keren. Als vier ontvangers met nauwkeurig gesynchroniseerde klokken elk het moment vastleggen waarop dezelfde uitzending aankomt, onthullen de verschillen tussen die momenten de verschillen in afstand: een bericht dat ontvanger A één microseconde eerder bereikte dan ontvanger B, werd verzonden vanaf een punt dat 300 m dichter bij A ligt dan bij B. Alle punten met die eigenschap liggen op een gekromd oppervlak, een hyperboloïde, tussen A en B. Drie zulke oppervlakken, van vier ontvangers, snijden elkaar in het vliegtuig. Dit is **multilateratie**, en het vereist een tijdmeting tot op ongeveer een tiende microseconde, 30 m, tussen ontvangers die honderden kilometers uit elkaar staan, en die halen de ontvangers bij dezelfde satellieten die het vliegtuig gebruikt.

Hetzelfde idee, twee keer
Satellietnavigatie: één ontvanger, vier zenders waarvan de posities bekend zijn, bereken de ontvanger. Multilateratie: één zender, vier ontvangers waarvan de posities bekend zijn, bereken de zender. In beide gevallen wordt in werkelijkheid tijd gemeten, en 1 microseconde is 300 meter.

HOOFDSTUK 11

Waarvoor het wordt gebruikt, en waar het tekortschiet

De luchtverkeersleiding is de eerste klant. In heel Europa zien verkeersleiders nu een samengevoegd beeld waarin ADS-B, met zijn updates van twee keer per seconde en satellietnauwkeurigheid, gecombineerd wordt met radar en multilateratie; waar de radar nooit kwam, boven de Noord-Atlantische Oceaan, het Noordpoolgebied, de Sahara en de meeste oceanen, worden ADS-B-berichten opgevangen door ontvangers aan boord van communicatiesatellieten in een lage baan, waardoor vliegtuigen die de Atlantische Oceaan oversteken veel dichter bij elkaar mogen vliegen dan vroeger. Vliegtuigen zijn de tweede klant: een verkeersvliegtuig met "ADS-B In" toont het verkeer in de buurt aan de bemanning en voert het in het botsingsvermijdingssysteem in. Luchthavens gebruiken het om vliegtuigen en voertuigen

op de grond te volgen bij mist. Onderzoekers gebruiken de open gegevens om geluid, brandstofverbruik, condensstrepen en vertragingen te bestuderen. En een ontvanger op een schooldak neemt, op kleine schaal, aan dit alles deel.

De zwakke punten van het systeem volgen rechtstreeks uit het ontwerp, en elk ervan verdient het om begrepen te worden in plaats van alleen opgesomd. Omdat de berichten onversleuteld worden uitgezonden, zonder versleuteling of handtekening, is er in een bericht zelf niets wat bewijst dat het van een vliegtuig komt. Een zender op de grond zou, illegaal, een volmaakt gevormd bericht kunnen uitzenden over een vliegtuig dat niet bestaat, en een ontvanger zou het zonder morren decoderen. Wat het systeem beschermt, is niet het bericht maar de context eromheen: een spookvliegtuig verschijnt niet op de radar, wordt niet gevonden door multilateratie en gedraagt zich niet als echt verkeer, en verkeersleidingscentra controleren voortdurend kruiselings. Een versie van het protocol met cryptografische handtekeningen is al jaren in bespreking; het obstakel is minder technisch dan praktisch, want elke transponder ter wereld zou moeten veranderen.

Omdat de positie afhangt van de satellietontvanger van het vliegtuig, verstoort alles wat satellietnavigatie verstoort ook ADS-B. Storing (jamming) en vervalsing (spoofing) van satellietsignalen komen inmiddels veel voor in de buurt van conflictgebieden, en een vliegtuig dat door zo'n gebied vliegt, kan misschien geen positie berekenen, of een verkeerde. Zijn berichten krijgen dan een verlaagde integriteitscategorie, het systeem van de verkeersleider markeert ze, en de radar, de onafhankelijke meting die ADS-B nooit volledig moest vervangen, neemt het over. De verhouding tussen beide is dus niet die van opvolger en voorganger, maar van partners met elkaar aanvullende zwakke punten.

Omdat de verplichting geldt voor verkeersvliegtuigen en de meeste grotere toestellen, maar niet voor alles wat vliegt, is de kaart bewust onvolledig. Lichte vliegtuigen buiten gecontroleerd luchtruim, zweefvliegtuigen, ballonnen en veel militaire vliegtuigen hebben soms helemaal geen ADS-B, en sommige lichte vliegtuigen gebruiken andere systemen die een ontvanger op 1090 MHz niet hoort. En omdat de uitzending het vliegtuig identificeert, kan ze ook de eigenaar identificeren: een bepaald privéjet volgen is in feite een bepaalde persoon volgen, wat heeft geleid tot programma's die de registratie verbergen van vliegtuigen waarvan de eigenaar dat vraagt, en tot een voortdurende discussie over de vraag of informatie die een vliegtuig aan de hele wereld uitzendt ook privé kan zijn. Die discussie is goed om aan oudere leerlingen voor te leggen, want de natuurkunde geeft er geen antwoord op.

HOOFDSTUK 12

Een korte geschiedenis

1935 tot 1945

Primaire radar wordt ontwikkeld in Groot-Brittannië, Duitsland en de Verenigde Staten; tegen het einde van de oorlog beantwoorden transponders voor "identification friend or foe" (vriend-of-vijandherkenning) radarpulsen met een gecodeerd antwoord, de voorloper van de secundaire radar.

Jaren 1950 tot 1960

De civiele secundaire radar wordt gestandaardiseerd: ondervragingen op 1030 MHz, antwoorden op 1090 MHz, Mode A-identiteitscodes en Mode C-hoogte.

Jaren 1980

Mode S, met unieke 24-bitsadressen en databerichten, wordt ontwikkeld bij het MIT Lincoln Laboratory en door de ICAO aangenomen. GPS wordt operationeel voor civiele gebruikers.

Jaren 1990 tot 2000

ADS-B wordt gedefinieerd en beproefd, met name in Alaska, waar radardekking onmogelijk was en ongelukken vaak voorkwamen. De extended squitter op 1090 MHz wordt internationaal gestandaardiseerd.

Jaren 2010

Goedkope softwaregedefinieerde radio's maken van ontvangst een hobby; vrijwilligersnetwerken van duizenden ontvangers ontstaan. Er worden ontvangers op satellieten gelanceerd voor dekking boven de oceanen.

2020

ADS-B wordt verplicht voor de meeste vliegtuigen in gecontroleerd luchtruim in de Verenigde Staten (januari) en de Europese Unie (juni, met een overgangsperiode tot het einde van het jaar). De lucht begint te praten, overal en altijd.

Woordenlijst

ADS-B
Automatic Dependent Surveillance - Broadcast. Vliegtuigen die hun eigen positie uitzenden.

Barometrische hoogte
Hoogte afgeleid van de luchtdruk, met een standaardatmosfeer; wat vliegtuigen melden.

CPR
Compact position reporting, het even/oneven-schema dat een precieze positie in 34 bits past.

CRC
Cyclische redundantiecontrole, de foutcontrole van 24 bits aan het einde van elk bericht.

Extended squitter (uitgebreide squitter)
De spontane Mode S-uitzending van 112 bits die ADS-B overbrengt.

GNSS
Wereldwijd satellietnavigatiesysteem: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou.

ICAO-adres
De vaste 24-bitsidentiteit van de transponder van een vliegtuig.

Mode S
De selectieve norm voor secundaire radar waarop ADS-B is gebouwd.

Multilateratie
Een zender lokaliseren aan de hand van verschillen in de aankomsttijd van het signaal bij meerdere ontvangers.

Padverlies
Het verzwakken van een signaal met de afstand, volgens de kwadratenwet.

Radiohorizon
De grootste afstand waarop een rechte lijn tussen antenne en vliegtuig vrij blijft van de aarde.

SDR
Softwaregedefinieerde radio: een tuner die ruwe signaalmonsters aan een computer doorgeeft om te decoderen.

SSR
Secundaire surveillanceradar: de grond ondervraagt, de transponder antwoordt.

Transponder
De radio in het vliegtuig die de radar antwoordt en ADS-B uitzendt op 1090 MHz.

Golflengte

Afstand tussen opeenvolgende toppen van een golf: c / f, 27,5 cm bij 1090 MHz.

VERDER

Van theorie naar praktijk: bouw de ontvanger

Twaalf hoofdstukken legden een systeem uit dat u nu in uw hand kunt houden. De praktische workshop maakt er een middag werk van: wat u voor 100 tot 150 euro koopt, hoe u de antenne bouwt en plaatst, hoe u een Raspberry Pi voorbereidt en de Dataero-feeder installeert, en hoe u de vliegtuigen die u hoort op de live kaart ziet verschijnen, op naam van uw station. Elk hoofdstuk hierboven heeft daar een meting die op u wacht: de radiohorizon tegenover echte vliegtuigen, de kwadratenwet in de kolom met de signaalsterkte, het dagelijkse ritme van de lucht.

Open de praktische workshop `https://radar.dataero.eu/nl/learning/workshop`