NATUURKUNDE EN INFORMATICA - 12 TOT 18 JAAR

De lucht ontcijferen

De regel hexadecimale tekens hieronder is een echt bericht, ongeveer twee keer per seconde verzonden door een echt vliegtuig. In 112 miljoenste van een seconde maakt het bekend welk vliegtuig het is en, in de berichten die erbij horen, waar het is, hoe hoog en hoe snel. Deze cursus behandelt alles wat je nodig hebt om het te begrijpen: de natuurkunde van de golf waarop het meereist, de timing die het vliegtuig zijn positie geeft, de codering die het in 112 bits verpakt, de meetkunde die bepaalt hoe ver het te horen is, en de ontvanger die je zelf kunt bouwen om het op te vangen.

Leren - https://radar.dataero.eu/nl/learning/ages-12-18/student 2026-11-21

INHOUD

Wat ADS-B is, op één pagina
LES 1 De golf: radio als onzichtbaar licht
LES 2 Timing en positie: hoe het vliegtuig weet waar het is
LES 3 Het bericht: 112 bits, en hoe fouten worden opgespoord
LES 4 Bereik: de kromming van de aarde en de kwadratenwet
LES 5 Antennes en ontvangers: van een golf van 27 centimeter tot een stip op een kaart
Uitdagingen
VOLGENDE STAP Bouw hem zelf

Wat ADS-B is, op één pagina

> `8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098`
>
> Eén extended squitter zoals een ontvanger hem vastlegt: 28 hexadecimale cijfers, 112 bits. Na les 3 kun je elk veld ervan lezen.

De luchtverkeersleiding moet voortdurend weten waar elk vliegtuig is om ze uit elkaar te houden: een verkeersvliegtuig op kruishoogte legt elke seconde 250 m af, en de separatieregels eisen 300 m verticaal of 9 km horizontaal tussen vliegtuigen onder radarleiding. Zeventig jaar lang was radar de manier om dat te weten: een grondstation zendt een puls uit en meet de tijd tot de echo terugkomt, of, in de verbeterde secundaire vorm, ondervraagt een transponder aan boord die op 1090 MHz antwoordt met een identiteit en een hoogte. Radar heeft grenzen: het vraagt enorm veel vermogen, het ziet elk vliegtuig maar één keer per omwenteling van de antenne, en het kan oceanen en bergen niet dekken.

ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, draait het probleem om. Elk modern vliegtuig heeft een ontvanger voor satellietnavigatie aan boord en kent zijn eigen positie dus tot op een paar meter. ADS-B laat de transponder van het vliegtuig die positie gewoon bekendmaken, samen met de identiteit, de hoogte en de snelheid, ongeveer twee keer per seconde, op 1090 MHz, aan niemand in het bijzonder. Automatic omdat niets het in gang zet; dependent omdat de informatie volledig uit de eigen instrumenten van het vliegtuig komt; surveillance omdat het doel is te weten waar vliegtuigen zijn;

broadcast omdat het onversleuteld wordt uitgezonden naar iedereen die luistert. Sinds 2020 is het verplicht voor de meeste vliegtuigen in het Europese en Amerikaanse luchtruim. Verkeersleiders gebruiken het naast radar, andere vliegtuigen gebruiken het om elkaar te zien, en een USB-ontvanger van 25 euro op het dak van een school hoort precies dezelfde berichten.

Om het systeem te begrijpen moet je vijf dingen begrijpen, en elk daarvan is een les: de elektromagnetische golf die het bericht draagt; de timing die het vliegtuig zijn positie geeft, en waarmee een netwerk ook een vliegtuig kan vinden dat niet zegt waar het is; het digitale bericht en hoe fouten erin worden opgespoord; de meetkunde en de energie die bepalen hoe ver het te horen is; en de antenne en de ontvanger die het weer in gegevens omzetten. Het volledige verhaal staat in de basiscursus; lees de hoofdstukken 3 en 5 ervan vóór les 3 en de hoofdstukken 6 tot 8 vóór de lessen 4 en 5.

LES 1

De golf: radio als onzichtbaar licht

Het bericht verlaat het vliegtuig als een elektromagnetische golf: trillende elektrische en magnetische velden die zich zonder medium door de ruimte voortplanten, met de lichtsnelheid c = 3,00 x 10^8 m/s. Zichtbaar licht is hetzelfde verschijnsel bij een hogere frequentie; je ogen reageren op ongeveer 4 tot 8 x 10^14 Hz, terwijl ADS-B wordt uitgezonden op 1,09 x 10^9 Hz, een half miljoen keer lager. Er is geen wezenlijk verschil tussen het bericht van het vliegtuig en het licht van dit scherm, alleen een verschil in frequentie.

Omdat de golf met een vaste snelheid reist, bepaalt de frequentie de golflengte. In één seconde komt de golf c meter verder en maakt hij f trillingen, dus elke trilling beslaat c / f meter: c = f x lambda. Voor ADS-B is lambda = 3,00 x 10^8 / 1,09 x 10^9 = 0,275 m. De golf tussen een vliegtuig en jouw antenne heeft toppen die 27,5 cm uit elkaar liggen, op het spectrum tussen een gsm-signaal (17 cm) en een FM-radiozender (3 m) in. Teken dat spectrum zelf, op een logaritmische as van 10^6 Hz tot 10^18 Hz, en zet er FM-radio, ADS-B, mobiele telefoons, wifi, infrarood, zichtbaar licht en röntgenstraling op. De golf van het vliegtuig zit tussen de dingen in je broekzak.

```
c = f x lambda
```

3,00 x 10^8 m/s = 1,09 x 10^9 Hz x 0,275 m

Wat een radiogolf niet is, is geluid. Geluid is een drukgolf in een medium, die zich met 343 m/s voortplant in lucht, met 1 500 m/s in water en helemaal niet in vacuüm. Radio is licht: het heeft geen medium nodig, en zo steekt het het vacuüm over van een satelliet naar het vliegtuig, en het is sneller met een factor 3,00 x 10^8 / 343, ongeveer 875 000. Als een vliegtuig op 30 km afstand op hetzelfde moment een geluid en een bericht uitzendt, komt het bericht aan na 100 microseconden; het geluid komt 87 seconden later aan, en dan heeft het vliegtuig al 22 km gevlogen. Een golf in een touw heeft de eigenschappen die ertoe doen gemeen met licht, een golflengte, een frequentie en een vaste snelheid, zodat sneller schudden kortere golven geeft en geen snellere; het verschil is dat hij het touw nodig heeft.

Eén eigenschap van de golf wordt belangrijk in les 5: de polarisatie. Het elektrische veld trilt in een vaste richting loodrecht op de voortplantingsrichting. Vliegtuigantennes staan verticaal, dus de ADS-B-golf is verticaal gepolariseerd, en een ontvangstantenne die op zijn kant ligt vangt er bijna niets van op, zoals

een verticaal geschudde touwgolf wordt tegengehouden door een horizontale spleet. Voorspel nu wat er met het bereik van je ontvanger gebeurt als de antenne horizontaal ligt; je test het in het project.

LES 2

Timing en positie: hoe het vliegtuig weet waar het is

De positie in elk ADS-B-bericht komt van satellietnavigatie, en satellietnavigatie is een tijdmeting. Ongeveer dertig satellieten per systeem (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) draaien op zo'n 20 200 km hoogte, elk met een atoomklok, en elk zendt een signaal uit met zijn eigen positie en het exacte moment van uitzenden. De ontvanger in het vliegtuig noteert het moment van aankomst. Het verschil, vermenigvuldigd met c, is de afstand tot die satelliet; recht van boven doet het signaal er 20 200 / 300 000 = 0,0673 s over. Eén afstand plaatst de ontvanger op een bol rond die satelliet; twee bollen snijden elkaar in een cirkel; drie in twee punten, waarvan er één ver van de aarde ligt en wordt weggegooid. Drie satellieten zouden genoeg zijn als de ontvanger een perfecte klok had. Hij heeft een kwartskristal dat microseconden afwijkt, en één microseconde is 300 m afstand. Dus behandelt de ontvanger zijn eigen klokfout als een vierde onbekende en gebruikt hij een vierde satelliet: vier vergelijkingen, vier onbekenden (x, y, z en de klokafwijking), die doorlopend worden opgelost. Als bijproduct houdt elke satellietontvanger de tijd bij tot op tientallen nanoseconden, en daar is de tweede helft van deze les van afhankelijk.

Onthoud de ordes van grootte: licht legt 0,3 m af per nanoseconde en 300 m per microseconde. Een positie die tot op 3 m nauwkeurig is, betekent een timing die tot op 10 ns nauwkeurig is. Een satelliet waarvan de klok 1 microseconde voorliep, zou elke ontvanger die hem gebruikt 300 m verschuiven langs de lijn naar die satelliet toe, en daarom worden de klokken van de satellieten meerdere keren per dag vanaf de grond gecorrigeerd.

Het vliegtuig heeft twee hoogtes. De satellietoplossing geeft een geometrische hoogte boven de referentie-ellipsoïde. Maar de hoogte die het uitzendt voor de luchtverkeersleiding is barometrisch: de luchtdruk bij een opening in de romp, omgerekend naar hoogte via de Internationale Standaardatmosfeer, die uitgaat van 1013,25 hPa en 15 graden C op zeeniveau en een temperatuurdaling van 6,5 graden per kilometer. Als de echte luchtdruk van de standaard afwijkt, is de barometrische hoogte van elk vliegtuig met hetzelfde bedrag fout, en dat is precies wat separatie nodig heeft: twee vliegtuigen die vliegniveau 350 en 360 aflezen, vliegen 1 000 ft boven elkaar, welk weer het ook is. Het positiebericht bevat de barometrische hoogte in stappen van 25 voet; het snelheidsbericht bevat het verschil tussen de barometrische en de geometrische hoogte. Als je een spreadsheet hebt, keer dan p = p0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^5,255 om en controleer dat de druk op 11 000 m ongeveer 227 hPa is, minder dan een kwart van die op zeeniveau: in de lucht waarin een verkeersvliegtuig vliegt, zou je het bewustzijn verliezen.

Draai nu het hele idee om. Sommige vliegtuigen zenden op 1090 MHz zonder positie: oude transponders die de radar alleen antwoorden met identiteit en hoogte, of vliegtuigen waarvan de satellietontvangst wordt gestoord. Een netwerk van ontvangers kan ze toch lokaliseren door multilateratie. Stel dat vier ontvangers met gesynchroniseerde klokken elk de aankomsttijd van dezelfde uitzending vastleggen. 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, en al die punten samen vormen een hyperboloïde met A en B als brandpunten. Drie onafhankelijke paren uit vier ontvangers geven drie hyperboloïden, die elkaar

snijden in het vliegtuig. Het is het satellietprobleem met bekend en onbekend omgewisseld: daar één ontvanger en vier bekende zenders; hier één zender en vier bekende ontvangers. In beide gevallen meet je tijd, en 1 microseconde is 300 m. De ontvangers synchroniseren hun klokken tot op ongeveer 100 ns met dezelfde satellieten die het vliegtuig gebruikt.

Je kunt het met geluid doen. Drie mensen met stopwatches op uitgemeten punten op een sportveld; een vierde, die zich verstopt heeft, klapt één keer in de handen; elk noteert de vertraging. Met geluid van 343 m/s is een verschil van 0,1 s gelijk aan 34 m, en met een schaaltekening met proefposities, of een schets van de hyperbolen, vind je degene die klapte. Vraag je dan af hoe nauwkeurig de stopwatches zouden moeten zijn om hetzelfde te doen met radio over 200 km, en je begrijpt waarom het netwerk atoomtijd nodig heeft.

LES 3

Het bericht: 112 bits, en hoe fouten worden opgespoord

De transponder verzendt ADS-B als een Mode S extended squitter: een preambule van 8 microseconden, gevolgd door 112 databits met één bit per microseconde. De preambule is een vast patroon van vier pulsen op 0, 1, 3,5 en 4,5 microseconden, en hij beantwoordt een vraag waar je misschien niet aan had gedacht: hoe weet een ontvanger in een kanaal vol ruis en andere vliegtuigen dat een bericht is begonnen, en wanneer elke bit begint? De decoder zoekt voortdurend naar dat patroon, en zodra hij het ziet, weet hij allebei. Elk digitaal protocol dat je gebruikt, van wifi tot een QR-code, heeft iets vergelijkbaars.

Een zender kan aan of uit staan; hoe verstuurt hij dan een 1 of een 0? ADS-B gebruikt pulspositiemodulatie. Elk bitvak van één microseconde wordt in twee helften verdeeld: een puls in de eerste helft en stilte in de tweede is een 1; stilte en dan een puls is een 0. Er is altijd precies één puls per bit. Bedenk waarom dat beter is dan "puls betekent 1, geen puls betekent 0". De ontvanger raakt nooit zijn timing kwijt, zelfs niet bij een lange reeks nullen, die in het naïeve schema niet van stilte te onderscheiden zou zijn. En hij beslist elke bit door te kijken welke helft sterker was in plaats van of een puls boven een vast niveau uitkwam, zodat een zwak signaal van 400 km even betrouwbaar wordt gedecodeerd als een sterk signaal van recht boven je.

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 zijn als volgt ingedeeld, en je moet dit uit je hoofd kunnen reproduceren. Bits 1 tot 5: het downlinkformaat, 17 voor ADS-B van een transponder. Bits 6 tot 8: een capaciteitscode. Bits 9 tot 32: het 24-bits ICAO-adres, de vaste identiteit van het vliegtuig, toegekend bij de inschrijving; er bestaan er 2^24 = 16 777 216, in blokken toegewezen aan landen, waarbij België 448000 tot 44FFFF in hexadecimaal heeft. Bits 33 tot 88: het berichtveld van 56 bits, waarvan de eerste vijf bits, de typecode, zeggen wat de andere 51 bevatten. Typecodes 1 tot 4 bevatten de roepnaam als acht tekens van 6 bits,

met elk 64 mogelijke symbolen. Typecodes 9 tot 18 bevatten een positie in de lucht: 12 bits barometrische hoogte in stappen van 25 voet, een even/oneven-vlag en elk 17 bits gecodeerde breedte- en lengtegraad. Typecode 19 bevat de snelheid als oost-west- en noord-zuidcomponent van de grondsnelheid, de verticale snelheid en het verschil tussen barometrische en geometrische hoogte. Bits 89 tot 112: de pariteit van 24 bits. Controleer de rekensom: 12 bits hoogte in stappen van 25 ft dekken 102 400 ft; 17 bits die naïef over 180 graden breedte worden gebruikt, zouden maar tot op 1,4 km nauwkeurig zijn. De positie is beter dan dat dankzij compact position reporting: de 17 bits geven de positie binnen een zone tot op een paar meter, maar niet welke zone het is, en het vliegtuig wisselt af tussen twee zoneroosters, even en oneven. Een ontvanger die van elk één bericht heeft gehoord, bepaalt de zone eenduidig en volgt het vliegtuig daarna met losse berichten. Meer nauwkeurigheid uit dezelfde bits, betaald met tijd.

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

Ontleed het echte bericht bovenaan deze pagina. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 bestaat uit 28 hexadecimale cijfers, 112 bits. De eerste twee cijfers, 8D, zijn binair 1000 1101; de eerste vijf bits, 10001, zijn 17, dus dit is ADS-B van een transponder, en de volgende drie, 101, geven capaciteit 5. De volgende zes cijfers, 4840D6, zijn het ICAO-adres, dat volgens de toewijzingstabellen bij Nederland hoort. Het volgende paar cijfers, 20, begint met 00100, typecode 4, een identificatiebericht, en als je de tekens van 6 bits daarna decodeert, krijg je de roepnaam KLM1023. De laatste zes cijfers, 576098, zijn de pariteit. Met een spreadsheet of een paar regels code kun je het hele bericht decoderen, en het doel van deze les is dat je naar een regel hex kunt kijken en zeggen: "een KLM-toestel dat vlucht 1023 aankondigt".

De pariteit verdient het meeste nadenken. Boven een drukke luchthaven overlappen uitzendingen van verschillende vliegtuigen elkaar voortdurend bij een ontvanger, en losse pulsen gaan verloren in de ruis; een decoder zal dus onvermijdelijk soms verkeerde bits samenstellen. De laatste 24 bits zijn een cyclische redundantiecontrole: de 88 berichtbits worden behandeld als één lang binair getal en gedeeld, in een rekenkunde waarin aftrekken exclusive-or is, door een vaste generatorpolynoom van 25 bits; de rest is de CRC. De ontvanger herhaalt de deling met de bits die hij heeft gedecodeerd. Elke enkele omgeklapte bit, elke twee, en elke reeks fouten tot 24 bits lang verandert de rest, en dan wordt het bericht afgewezen. Probeer met de hand een CRC van 4 bits op een bericht van 8 bits om het mechanisme te zien en, als je programmeert, implementeer dan de echte CRC-24 en controleer dat het voorbeeldbericht slaagt en dat het omklappen van één willekeurige bit het laat mislukken. Zo doet elk modern systeem foutdetectie, hier in een situatie waarin een gemiste fout een spookvliegtuig op het scherm van een verkeersleider zou kunnen zetten.

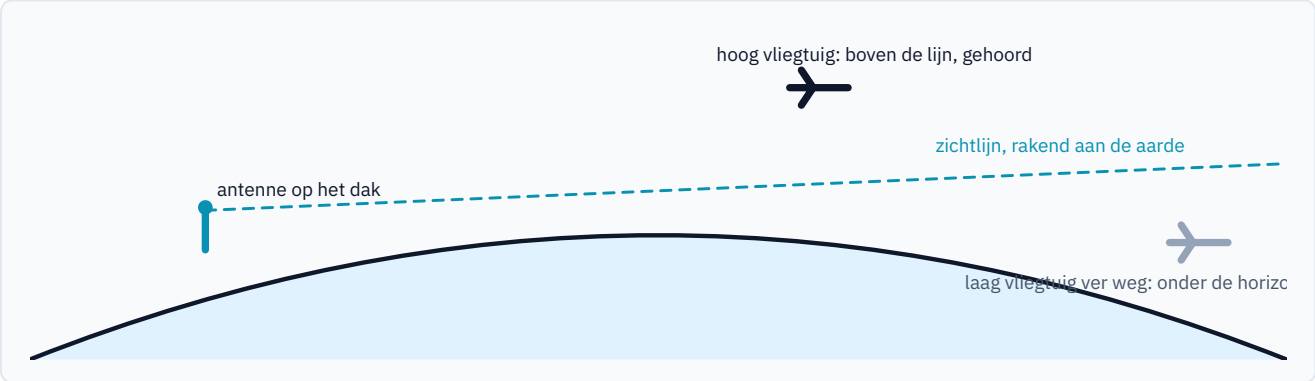
LES 4

Bereik: de kromming van de aarde en de kwadratenwet

Hoe ver weg kan een ontvanger een vliegtuig horen? Er gelden twee verschillende grenzen, en het loont om ze uit elkaar te houden. De eerste is meetkundig. Op 1090 MHz buigt radio niet om de aarde heen; hij gaat in rechte lijnen, dus een ontvanger hoort alleen vliegtuigen boven zijn horizon, die waarvan een rechte lijn naar de antenne vrij over de grond loopt. Leid de horizonafstand af. Een antenne op hoogte h boven een bol met straal R ziet een horizon waar zijn zichtlijn de bol raakt; de raaklijn en de twee stralen vormen een rechte hoek in het raakpunt, dus d^2 + R^2 = (R + h)^2, wat d^2 = 2Rh + h^2 geeft, en omdat h verwaarloosbaar is ten opzichte van R, d = sqrt(2Rh). Met R = 6 371 km en h in meter is d (km) = 3,57 sqrt(h). De atmosfeer buigt radio een beetje naar beneden omdat de brekingsindex met de hoogte afneemt; de standaardcorrectie behandelt de aarde alsof ze vier derde van haar echte straal heeft, waardoor 3,57 wordt vervangen door 4,12. De volledige zichtlijn van een antenne op h1 naar een vliegtuig op h2 is de som van de twee horizonafstanden:

```
d (km) = 4.12 x ( sqrt(h1) + sqrt(h2) )   with h1, h2 in metres
```

Antenne op een dak van 20 m, vliegtuig op 11 000 m: 4,12 x (4,47 + 104,9) = 451 km. Dezelfde antenne, vliegtuig op 1 000 m: 149 km. Vliegtuig op een startbaan 30 km verderop: 4,12 x (4,47 + 2) = 27 km, dus niet te horen.



Zet d uit tegen h2 voor de hoogte van je eigen antenne. De kromme loopt eerst steil en vlakt dan af, en ze verklaart de vorm van de dekking van elke ontvanger: 400 km en meer voor verkeer op kruishoogte, een paar tientallen kilometers voor vliegtuigen in de nadering, niets op de grond behalve op het vliegveld om de hoek. Ze verklaart waarom hoogte de belangrijkste eigenschap van een ontvanger is, en waarom een heuvel, een gebouw of de eigen vleugel van het vliegtuig als het wegdraait een spoor meteen kan afbreken.

De tweede grens is energie. Een transponder straalt een paar honderd watt uit, ongeveer gelijkmatig in alle horizontale richtingen. Op afstand d is dat vermogen verdeeld over een bol met oppervlakte 4 pi d^2, dus het vermogen dat een antenne met een vaste effectieve oppervlakte opvangt, neemt af met 1 / d^2: de kwadratenwet, die je moet afleiden uit de oppervlakte van de bol in plaats van uit je hoofd te leren. Twee keer zo ver, een kwart van het vermogen; tien keer zo ver, een honderdste. Ingenieurs drukken het verlies uit in decibel, waarbij 10 dB een factor tien in vermogen is en 3 dB een factor twee, omdat decibels vermenigvuldigingen over vele ordes van grootte veranderen in optellingen. De vrije-ruimteverzwakking tussen twee eenvoudige antennes is:

```
path loss (dB) = 20 log10( d in km ) + 20 log10( f in MHz ) + 32.44
```

Op 400 km en 1090 MHz: 52,0 + 60,7 + 32,4 = 145 dB. Een zender van 250 W is +54 dBm; ontvangen vermogen 54 - 145 = -91 dBm, ongeveer 8 x 10^-13 W.

Sta even stil bij dat getal: een ontvanger op een dak detecteert een signaal dat 10^14,5 keer zwakker is dan het signaal dat het vliegtuig verliet, een miljoenste van een miljoenste watt. Een goede hobbyontvanger decodeert tot ongeveer -100 dBm, dus op 400 km is er nog 9 dB marge. Met andere woorden: de energiegrens en de meetkundige horizon van een verkeersvliegtuig op kruishoogte liggen op dezelfde plek, en dat is zo ontworpen: het vermogen van transponders en de normen voor ontvangers zijn zo vastgelegd dat een vliegtuig tot aan zijn horizon te horen is en niet veel verder, zodat het kanaal niet overspoeld wordt door verkeer uit het buurland.

Twee verfijningen. Doppler: een vliegtuig dat met 250 m/s nadert, verschuift de ontvangen frequentie met f v / c = 1,09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz, minder dan een miljoenste, wat een ontvanger nooit merkt; vergelijk dat met het geluid van hetzelfde vliegtuig, waarbij v / c gelijk is aan 250 / 343 en de toonhoogte bij het voorbijvliegen bijna een octaaf zakt. En de looptijd: 400 km met c duurt 1,33 ms, dus de uitgezonden positie is bij aankomst al 1,33 ms oud, en in die tijd heeft het vliegtuig 33 cm afgelegd; verwaarloosbaar voor een kaart, beslissend voor multilateratie, die precies op deze microseconden draait.

LES 5

Antennes en ontvangers: van een golf van 27 centimeter tot een stip op een kaart

Een antenne is een geleider waarin een passerende elektromagnetische golf een wisselstroom opwekt, en hetzelfde ding zendt een golf uit als je er een stroom doorheen stuurt; ontvangst- en zendantennes zijn hetzelfde, alleen andersom gebruikt. De opgewekte stroom is het grootst bij resonantie, als de lengte van de geleider ervoor zorgt dat de stroomverdeling erlangs past bij de trilling van de golf, zoals een snaar met de juiste lengte meetrilt met een bepaalde toon. De grondresonantie van een rechte geleider ligt bij een halve golflengte, 13,75 cm op 1090 MHz, met de grootste stroom in het midden en nul aan de uiteinden. De praktische ADS-B-antenne, op vliegtuigen en op de meeste ontvangers, is een kwartgolf-monopool: een verticaal element van 6,9 cm op een geleidend grondvlak, dat het spiegelt zodat element en spiegelbeeld samen de halvegolfdipool vormen. Op het vliegtuig is de romp het grondvlak; een gekochte 1090 MHz-antenne verbergt dezelfde vorm in zijn buis, meerdere keren boven elkaar gestapeld. Een zelfgemaakte antenne raakt door een paar millimeter fout ontstemd en hoort maar een deel van de lucht, en daarom gebruikt de ontvanger van het project een antenne die in de fabriek is afgestemd.

Een verticale monopool is het gevoeligst richting de horizon en helemaal niet langs zijn eigen as; zijn gevoeligheid in drie dimensies is een donut met de antenne door het gat. Je ontvanger hoort dus vliegtuigen op 300 km afstand perfect en verliest er een die recht boven je overvliegt een paar seconden, en je kunt dat zien gebeuren. Een collineaire antenne, met meerdere resonerende elementen boven elkaar, maakt de donut platter en verhoogt de gevoeligheid aan de horizon ten koste van het gat erboven:

dat is antennewinst, gemeten in dBi, en die ontstaat door gevoeligheid te herverdelen, nooit door ze te creëren. En uit les 1 weet je dat de antenne verticaal moet staan, omdat de golf verticaal gepolariseerd is.

Tussen de antenne en een stip op de kaart zitten vier stappen. Een banddoorlaatfilter laat 1090 MHz door en houdt de veel sterkere gsm-signalen een paar honderd megahertz verderop tegen, die anders alles daarna zouden verzadigen. Een ruisarme versterker bij de antenne vermenigvuldigt het signaal duizend keer vóór de kabel, die op 1090 MHz ongeveer 3 dB verliest, de helft van het signaal, per tien meter; versterk je na de kabel, dan versterk je ook de ruis van de kabel. Een software-defined radio, een USB-apparaatje van 20 euro dat oorspronkelijk als tv-tuner werd verkocht, mengt het signaal omlaag en bemonstert het twee miljoen keer per seconde tot een stroom getallen. Vanaf hier is het programmeren: gratis software doorzoekt de samples naar de preambule, meet welke helft van elk microsecondevak meer energie bevat, stelt 112 bits samen, berekent de CRC en decodeert, als die klopt, de velden. Een tracker koppelt dan even en oneven positieberichten, voegt positie, snelheid en identiteit samen per ICAO-adres en houdt de toestand van elk vliegtuig bij tot er geen berichten meer binnenkomen, meestal omdat het onder de horizon is gezakt.

Teken die keten, met de grootheid bij elke stap: nanovolts bij de antenne, microvolts na de versterker, twee miljoen samples per seconde uit de radio, een paar honderd berichten per seconde uit de decoder, één record per vliegtuig uit de tracker. Een stip op een kaart is het uiteinde van een keten waarin elke schakel een idee uit deze cursus is: resonantie, filteren, versterken, bemonsteren, patronen herkennen, decoderen, foutcontrole, samenvoegen. Het project is die keten te bouwen en de cursus te toetsen aan de lucht: meet je maximale bereik tegen de hoogte en vergelijk het met de horizonformule; vergelijk de antenne binnen, bij een raam en op het dak, verticaal en horizontaal; registreer een dag verkeer en zoek het drukste uur en de gebruikelijke kruishoogte; decodeer ruwe berichten en controleer hun CRC met je eigen code. En stel dan de vragen die het systeem oproept maar niet beantwoordt: de berichten zijn niet ondertekend, dus wat houdt iemand tegen om een spookvliegtuig uit te zenden; het vliegtuig is afhankelijk van satellieten die gestoord kunnen worden, dus wat ziet de verkeersleider als dat gebeurt; en de gegevens identificeren vliegtuigen, die mensen kunnen identificeren, dus wie zou wie mogen volgen?

Uitdagingen

Werk ze eerst allemaal op papier uit. De controle toont het antwoord en de redenering.

1. **1. Wat is de golflengte van het 1090 MHz-signaal, en hoe lang is een kwartgolfantenne daarvoor?**

2. **2. Hoeveel keer sneller dan geluid is het bericht? Een vliegtuig op 30 km afstand zendt beide tegelijk uit; hoe ver heeft het gevlogen als het geluid aankomt?**

3. **3. De klok van een ontvanger loopt 2 microseconden fout. Welke afstandsfout geeft dat, en waarom heeft een satellietontvanger vier satellieten nodig in plaats van drie?**

4. **4. Hoeveel vliegtuigen kun je met 24 adresbits identificeren? Hoe lang duurt een bericht van 112 bits met 1 bit per microseconde, en de hele uitzending met preambule?**

5. **5. Wat zijn in het bericht 8D4840D6… het downlinkformaat en de capaciteit, en wat is het ICAO-adres?**

6. **6. Een ontvangstantenne staat 15 m hoog. Wat is de radiohorizon naar een vliegtuig op 9 000 m, en naar een op 300 m?**

7. **7. Waarom wordt het ontvangen vermogen een kwart als de afstand verdubbelt? Wat is de vrije-ruimteverzwakking op 200 km, en hoe verhoudt die zich tot de 145 dB op 400 km?**

8. **8. Voorspel wat er met het bereik gebeurt als de antenne horizontaal wordt gelegd, en als de ontvanger van het dak naar de begane grond wordt verplaatst.**

VOLGENDE STAP

Bouw hem zelf

Alles uit deze lessen kun je vanaf een raam controleren. De praktische workshop geeft je de boodschappenlijst (ongeveer 100 tot 150 euro, of een Raspberry Pi die je al hebt), welke antenne je kiest en waar je hem plaatst, de drie commando's die de Dataero-feeder installeren, en de metingen die de formules toetsen aan echte vliegtuigen: de radiohorizon, de kwadratenwet, het dagritme. Als je ontvanger de kaart voedt, wordt elk vliegtuig dat hij hoort voor iedereen getekend, met de naam van jouw station erbij.

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

Antwoorden

1. 1. Wat is de golflengte van het 1090 MHz-signaal, en hoe lang is een kwartgolfantenne daarvoor?
   lambda = c / f = 3,00 x 10^8 / 1,09 x 10^9 = 0,275 m. Een kwartggolfelement is 6,9 cm. Door de vaste lichtsnelheid zijn frequentie en golflengte omgekeerd evenredig.
2. 2. Hoeveel keer sneller dan geluid is het bericht? Een vliegtuig op 30 km afstand zendt beide tegelijk uit; hoe ver heeft het gevlogen als het geluid aankomt?
   3,00 x 10^8 / 343 = ongeveer 875 000 keer. Het bericht komt aan na 100 microseconden, het geluid na 87 s, en in die tijd vliegt het vliegtuig met 250 m/s 22 km.
3. 3. De klok van een ontvanger loopt 2 microseconden fout. Welke afstandsfout geeft dat, en waarom heeft een satellietontvanger vier satellieten nodig in plaats van drie?
   2 x 10^-6 s x 3 x 10^8 m/s = 600 m. Drie satellieten leggen x, y en z alleen vast als de klok perfect is; de klokafwijking is een vierde onbekende, dus is er een vierde satelliet nodig.
4. 4. Hoeveel vliegtuigen kun je met 24 adresbits identificeren? Hoe lang duurt een bericht van 112 bits met 1 bit per microseconde, en de hele uitzending met preambule?
   2^24 = 16 777 216. De data duren 112 microseconden; met de preambule van 8 microseconden 120 microseconden.
5. 5. Wat zijn in het bericht 8D4840D6… het downlinkformaat en de capaciteit, en wat is het ICAO-adres?
   8D = 1000 1101. Eerste vijf bits 10001 = 17: DF 17, ADS-B van een Mode S-transponder. Volgende drie bits 101 = 5: CA 5. Het ICAO-adres is 4840D6, toegewezen aan Nederland.
6. 6. Een ontvangstantenne staat 15 m hoog. Wat is de radiohorizon naar een vliegtuig op 9 000 m, en naar een op 300 m?
   d = 4,12 x (sqrt(15) + sqrt(9000)) = 4,12 x (3,87 + 94,9) = 407 km. Voor 300 m: 4,12 x (3,87 + 17,3) = 87 km.
7. 7. Waarom wordt het ontvangen vermogen een kwart als de afstand verdubbelt? Wat is de vrije-ruimteverzwakking op 200 km, en hoe verhoudt die zich tot de 145 dB op 400 km?
   Het uitgezonden vermogen verspreidt zich over een bol met oppervlakte 4 pi d^2, die op dubbele afstand vier keer zo groot is. Op 200 km: 20 log10(200) + 20 log10(1090) + 32,44 = 46,0 + 60,7 + 32,4 = 139 dB, 6 dB (een factor vier) minder dan op 400 km.
8. 8. Voorspel wat er met het bereik gebeurt als de antenne horizontaal wordt gelegd, en als de ontvanger van het dak naar de begane grond wordt verplaatst.
   Horizontaal: de antenne is kruisgepolariseerd ten opzichte van de verticale golf; de opgewekte stroom hangt af van de veldcomponent langs de geleider, dus hij hoort heel weinig. Begane grond: de horizonterm 4,12 sqrt(h1) wordt kleiner en gebouwen blokkeren de zichtlijn, dus het bereik daalt sterk, vooral voor lage vliegtuigen.