12 TOT 18 JAAR - VOOR DE LEERKRACHT

De lucht ontcijferen: natuurkunde en informatica aan de hand van één echt systeem

Vijf lessen en een project. Elke les neemt één onderdeel van ADS-B en werkt de natuurkunde of de informatica erachter volledig uit: afleidingen waar de klas ze kan volgen, uitgewerkte voorbeelden met echte getallen, de demonstraties die het idee waarneembaar maken, en de punten waarop de intuïtie van leerlingen de mist ingaat. De jongste leerlingen (12 tot 14) volgen de ideeën en het rekenwerk; de oudsten (15 tot 18) volgen de afleidingen en voeren het project uit.

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

INHOUD

Voordat u begint: waarom één echt systeem vijf lessen waard is

LES 1 - NATUURKUNDE Golven en het elektromagnetisch spectrum: waarop het bericht reist

LES 2 - NATUURKUNDE EN WISKUNDE Timing en positie: hoe het vliegtuig weet waar het is, en hoe een netwerk er een vindt dat het niet zegt

LES 3 - INFORMATICA Het digitale bericht: 112 bits, hoe ze worden verzonden en hoe fouten worden opgespoord

LES 4 - NATUURKUNDE Voortplanting en bereik: de kromming van de aarde en de kwadratenwet

LES 5 - NATUURKUNDE EN TECHNIEK Antennes en ontvangers: van een golf van 27 centimeter tot een stip op een kaart

PROJECT - TWEE TOT VIER WEKEN Bouw een ontvanger en toets de natuurkunde aan de lucht

Antwoorden op de uitdagingen van de leerling

VOLGENDE STAP Het project, stap voor stap

Voordat u begint: waarom één echt systeem vijf lessen waard is

Het grootste deel van de natuurkunde die tussen 12 en 18 jaar wordt onderwezen, komt in losse stukken: hier een hoofdstuk over golven, daar een over het elektromagnetisch spectrum, een onderwerp over digitale gegevens bij informatica, een vermelding van satellieten bij aardrijkskunde. ADS-B is één werkend systeem waarin al die stukken tegelijk dragend zijn, en waarvan de klas het resultaat kan waarnemen met een ontvanger die minder kost dan een schoolboek. Een vliegtuig bepaalt zijn positie door de looptijd van radiosignalen van satellieten te meten: dat is trilateratie en de lichtsnelheid. Het codeert het resultaat in 112 bits met een cyclische redundantiecontrole: dat is binaire codering en foutdetectie. Het zendt die bits uit als een pulspositiegemoduleerde radiogolf op 1090 MHz: dat is het spectrum, frequentie en golflengte. De golf bereikt een ontvanger alleen langs een rechte lijn die vrij blijft van de kromming van de aarde, en komt aan met een sterkte die afneemt met het kwadraat van de afstand: dat is meetkunde en energie. Een afgestemde antenne van een kwart golflengte zet hem om in

een stroom: dat is resonantie. En een netwerk van ontvangers kan zelfs een zwijgende zender lokaliseren uit verschillen in aankomsttijd: dat is het satellietprobleem binnenstebuiten gekeerd. Elke les hieronder neemt één van deze onderwerpen en werkt het op zichzelf uit, met ADS-B als doorlopend voorbeeld in plaats van als versiering.

De basiscursus op de startpagina beschrijft het hele systeem in verhaalvorm; de klas leest het best de hoofdstukken 3 en 5 ervan vóór les 3 en de hoofdstukken 6 tot 8 vóór de lessen 4 en 5, en de woordenlijst is een handig hand-out. Deze pagina gaat ervan uit dat u die cursus hebt gelezen en concentreert zich op de natuurkunde en de didactiek. De getalconventies zijn overal dezelfde: c = 3,00 x 10^8 m/s, f = 1090 MHz, hoogtes in meter, afstanden in kilometer, en het vliegtuig op kruishoogte wordt genomen op 11 000 m (vliegniveau 360) en 250 m/s, tenzij het voorbeeld iets anders zegt.

Twee waarschuwingen over intuïtie. Leerlingen komen binnen met de overtuiging dat radiogolven een soort geluid zijn en dat "de radar" of "de satellieten" vliegtuigen zien. Beide zijn onjuist, beide worden expliciet behandeld in de lessen 1 en 2, en beide duiken weer op; de cursus is zo opgebouwd dat elke volgende les u een nieuwe aanleiding geeft om ze te corrigeren. En leerlingen die goed met formules overweg kunnen, voelen zich vaak niet thuis bij ordes van grootte: de cursus vraagt bij elke stap nadrukkelijk "hoe groot is dat?", omdat 300 m per microseconde, 145 dB vrije-ruimteverzwakking en 2^24 adressen het soort getallen zijn waardoor de natuurkunde echt aanvoelt.

LES 1 - NATUURKUNDE

Golven en het elektromagnetisch spectrum: waarop het bericht reist

Begin bij de waarneming waarop de hele cursus rust: het radiobericht van een vliegtuig en een lichtbundel zijn hetzelfde natuurkundige verschijnsel. Beide zijn elektromagnetische golven, trillende elektrische en magnetische velden die zich zonder enig medium door de ruimte voortplanten, met een snelheid c die in vacuüm voor elke frequentie gelijk is en in lucht vrijwel gelijk: 299 792 458 m/s, wat de klas mag afronden op 3,00 x 10^8 m/s. Wat radio van zichtbaar licht onderscheidt, en zichtbaar licht van röntgenstraling, is alleen de frequentie f van de trilling. Ons netvlies reageert op frequenties tussen ongeveer 4 x 10^14 en 8 x 10^14 Hz, die we waarnemen als rood tot violet; ADS-B wordt uitgezonden op 1,09 x 10^9 Hz, ongeveer een half miljoen keer lager. Aan de golf zelf is niets wezenlijk anders; alleen onze ogen zijn selectief.

Leid de golfvergelijking samen met de klas af in plaats van haar te geven. Als een golf met snelheid c reist en f keer per seconde trilt, dan is hij na één seconde een afstand c opgeschoven en heeft hij f volledige trillingen gemaakt; elke trilling beslaat dus een lengte c / f. Die lengte is de golflengte, lambda, en dus c = f x lambda. Toegepast op ADS-B: lambda = 3,00 x 10^8 / 1,09 x 10^9 = 0,275 m. Het bericht tussen het vliegtuig en de ontvanger heeft toppen die 27,5 cm uit elkaar liggen. Laat de klas dat plaatsen op een spectrum dat ze zelf tekenen, op een logaritmische as: FM-radio op 100 MHz en 3 m, ADS-B op 1 090 MHz en 27,5 cm, mobiele telefoons op 1 800 MHz en 17 cm, wifi en magnetrons op 2 450 MHz en 12 cm, infrarood, zichtbaar licht op 5,6 x 10^14 Hz en 540 nm, en zo verder tot röntgenstraling. De oefening om de golf van het vliegtuig tussen een telefoon en een magnetron te plaatsen, is meer waard dan welke tabel ook, omdat ze duidelijk maakt dat dit buren zijn.

Ga nu rechtstreeks in op de verwarring met geluid, want die is universeel en het contrast leert beide verschijnselen. Geluid is een longitudinale drukgolf in een medium; de snelheid is een eigenschap van het medium, 343 m/s in lucht van 20 graden, ongeveer 1 500 m/s in water, en nul in vacuüm. Radio is een transversale elektromagnetische golf die helemaal geen medium nodig heeft en met c reist in vacuüm, en onmerkbaar langzamer in lucht. Zet een getal op het verschil: 3,00 x 10^8 gedeeld door 343 is ongeveer 875 000. Een vliegtuig op 30 km afstand dat op hetzelfde moment een geluid en een bericht uitzendt, levert het bericht af na 100 microseconden en het geluid na 87 seconden; tegen de tijd dat het geluid aankomt, heeft het vliegtuig 22 km gevlogen. De demonstratie is een touw in het klaslokaal en een zaklamp aan de overkant van het sportveld: een touwgolf heeft zichtbaar het touw nodig en reist met een snelheid die het touw bepaalt, en een lichtflits bereikt het andere eind zonder vertraging die iemand kan meten. Som expliciet op wat het touw gemeen heeft met licht (een golf, een golflengte, een frequentie, een vaste snelheid en dus een omgekeerd verband tussen f en lambda) en wat niet (een medium, een snelheid van meters per seconde).

Sluit af met polarisatie, die goedkoop te tonen is en in les 5 haar nut bewijst. Het elektrische veld van een elektromagnetische golf trilt in een vaste richting loodrecht op de voortplantingsrichting. Transponderantennes van vliegtuigen staan verticaal, dus de ADS-B-golf is verticaal gepolariseerd; een ontvangstantenne moet ook verticaal staan, en horizontaal gedraaid hoort ze bijna niets. Een verticaal geschudde touwgolf gaat door een verticale spleet in een kartonnen doos en wordt tegengehouden door een horizontale; twee stukjes polarisatiefolie (uit een goedkope 3D-bril) die gekruist tegen een raam worden gehouden, laten hetzelfde zien voor licht. Vraag de klas te voorspellen wat er met de ontvangst gebeurt als een ontvangstantenne plat wordt gelegd. Ze toetsen die voorspelling in het project.

Uitgewerkt voorbeeld als opdracht
Het tweede ADS-B-systeem, dat in de Verenigde Staten door lichte vliegtuigen wordt gebruikt, zendt uit op 978 MHz. Wat is de golflengte, en hoe lang zou een kwartgolfantenne ervoor zijn? (0,307 m; 7,7 cm.) Een leerling die dit kan, beheerst les 1.

LES 2 - NATUURKUNDE EN WISKUNDE

Timing en positie: hoe het vliegtuig weet waar het is, en hoe een netwerk er een vindt dat het niet zegt

Alles wat het vliegtuig over zijn positie uitzendt, komt van satellietnavigatie, en satellietnavigatie is in de grond een tijdmeting. Elke GNSS-satelliet, die op ongeveer 20 200 km hoogte draait, heeft een atoomklok aan boord en zendt een signaal uit met zijn eigen positie en het exacte moment van uitzenden. Een ontvanger noteert het moment van aankomst. Het verschil, vermenigvuldigd met c, is de afstand tot die satelliet, en één zo'n afstand plaatst de ontvanger op een bol met die straal rond de satelliet. Laat de klas het aantal zelf afleiden: twee bollen snijden elkaar in een cirkel, drie in twee punten, waarvan er één ver van het aardoppervlak ligt en kan worden weggegooid. Drie satellieten volstaan dus, als de ontvanger een perfecte klok heeft. Die heeft hij helemaal niet; een kwartsoscillator wijkt veel meer af dan de vereiste nanoseconden. De oplossing, het elegante hart van het onderwerp, is de klokfout van de ontvanger als een vierde onbekende te behandelen en een vierde satelliet te gebruiken: vier vergelijkingen met vier onbekenden (x, y, z en de klokafwijking), doorlopend opgelost.

Een GNSS-ontvanger heeft dus vier satellieten in zicht nodig, en als bijproduct houdt hij de tijd bij tot op tientallen nanoseconden; daarom gebruiken de ontvangers in het netwerk van les 5 voor hun klokken dezelfde satellieten als het vliegtuig.

Zet de ordes van grootte op het bord en kom er steeds op terug. Licht legt 0,300 m af in een nanoseconde en 300 m in een microseconde. Een tijdfout van 1 microseconde is een afstandsfout van 300 m; de nauwkeurigheid van een paar meter van een moderne ontvanger komt overeen met een timing op het niveau van tien nanoseconden. De looptijd vanaf een satelliet recht boven je is 20 200 km / 3,00 x 10^5 km/s = 0,0673 s, en vanaf een satelliet bij de horizon ongeveer 0,086 s, dus de ontvanger meet verschillen van enkele milliseconden met een precisie van een honderdmiljoenste daarvan. Vraag de klas wat er zou gebeuren als de klok van een satelliet één microseconde voorliep; ze moeten inzien dat elke ontvanger die hem gebruikt, ongeveer 300 m zou verschuiven langs de lijn naar die satelliet toe, en daarom worden de satellietklokken meerdere keren per dag vanaf de grond gecorrigeerd.

Maak onderscheid tussen de twee hoogtes, want het bericht bevat ze allebei en leerlingen vragen er altijd naar. De satellietoplossing geeft een geometrische hoogte boven de referentie-ellipsoïde van de aarde. Toch melden vliegtuigen een barometrische hoogte: de statische druk buiten de romp, omgerekend naar hoogte via de Internationale Standaardatmosfeer, die uitgaat van 1013,25 hPa en 15 graden op zeeniveau en een daling van 6,5 graden per kilometer. Op een dag waarop 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. ADS-B-positieberichten bevatten de barometrische hoogte in stappen van 25 voet; het snelheidsbericht bevat het verschil tussen barometrische en geometrische hoogte, zodat een ontvanger beide kan achterhalen. Voor de oudere groep is de ISA-relatie p = p0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^5,255 een goede spreadsheetoefening: keer haar om om h uit p te vinden en controleer dat 11 000 m overeenkomt met ongeveer 227 hPa, een vijfde van de druk op zeeniveau.

Keer het probleem nu binnenstebuiten. Sommige vliegtuigen zenden op 1090 MHz zonder satellietpositie: oudere transponders die de radar alleen antwoorden met identiteit en hoogte, of vliegtuigen waarvan de GNSS wordt gestoord. Een netwerk van ontvangers kan ze toch lokaliseren. Stel dat vier ontvangers met gesynchroniseerde klokken de aankomsttijd van dezelfde uitzending vastleggen. De zender is onbekend, de ontvangers zijn bekend: dit is het GNSS-probleem met de rollen van bekend en onbekend omgewisseld. Een bericht dat bij ontvanger A één microseconde eerder aankwam dan bij ontvanger B, werd verzonden vanaf een punt dat 300 m dichter bij A ligt dan bij B, en de verzameling van zulke punten is een hyperboloïde met A en B als brandpunten. Drie onafhankelijke paren uit vier ontvangers geven drie hyperboloïden, waarvan het snijpunt het vliegtuig is. Dit is multilateratie, en daarvoor moeten de klokken van de ontvangers tot op ongeveer 100 ns overeenkomen, wat ze via de satellieten bereiken. Breng het voor de klas terug tot twee dimensies met de oefening op de speelplaats: drie leerlingen met stopwatches op uitgemeten punten, een vierde die zich ergens verstopt klapt in de handen, de drie noteren hun vertragingen, gecorrigeerd voor de reactietijd, en de klas tekent de hyperbolen (of, eenvoudiger, gebruikt proefposities op een schaaltekening) om degene die klapte te vinden, met 343 m/s. Vraag dan hoe nauwkeurig de timing zou moeten zijn om hetzelfde te doen met radio over 200 km, en laat ze de kloof voelen tussen een stopwatch en een atoomklok.

Uitgewerkt voorbeeld als opdracht
Twee ontvangers die 60 km uit elkaar staan, registreren een bericht met 50 microseconden verschil. Hoeveel dichter bij de eerste ontvanger was het vliegtuig? (15 km.) Als de klokken onderling 1 microseconde verschilden, welke fout zou dat in het antwoord geven? (300 m.) Een leerling die kan uitleggen waarom het tweede antwoord niet van de afstand afhangt, heeft begrepen wat multilateratie vraagt.

LES 3 - INFORMATICA

Het digitale bericht: 112 bits, hoe ze worden verzonden en hoe fouten worden opgespoord

De transponder van het vliegtuig verzendt zijn ADS-B-gegevens als een Mode S extended squitter: een preambule van 8 microseconden, gevolgd door 112 databits met precies één bit per microseconde. Begin de les met de preambule, want die beantwoordt een vraag waar leerlingen nog niet aan hebben gedacht: hoe weet een ontvanger dat een bericht is begonnen, als het kanaal vol ruis en andere vliegtuigen zit? De preambule is een vast patroon van vier pulsen op 0, 1, 3,5 en 4,5 microseconden. Een decoder zoekt voortdurend naar dat patroon; als hij het vindt, weet hij zowel dat er een bericht volgt als precies wanneer elk bitvak begint. Elk digitaal protocol dat de leerlingen kennen, van wifi tot een QR-code, heeft iets vergelijkbaars, en dit is een goed moment om dat te zeggen.

Dan de modulatie. Een zender kan aan of uit staan; hoe verstuur je een 1 of een 0? ADS-B gebruikt pulspositiemodulatie: elk bitvak van één microseconde wordt in twee helften verdeeld, en een puls in de eerste helft gevolgd door stilte betekent 1, stilte gevolgd door een puls betekent 0. Teken een paar bits als pulsen op het bord en laat de klas ze lezen. Vraag dan waarom dit beter is dan het voor de hand liggende schema "puls betekent 1, geen puls betekent 0". Met een beetje hulp komen er twee redenen naar boven. Er is altijd precies één puls per bit, zodat de ontvanger zijn timing vast kan houden, zelfs bij een reeks nullen, en hij kan elke bit beslissen door te kijken welke helft sterker was in plaats van of een puls boven een absolute drempel uitkwam, waardoor het decoderen ongevoelig wordt voor hoe sterk het signaal toevallig is. Een lange reeks nullen zou in het naïeve schema niet van stilte te onderscheiden zijn; in PPM is het een regelmatig ritme van pulsen in de tweede helft.

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.

Nu de indeling van de 112 bits, die de klas aan het eind van de les uit het hoofd moet kunnen reproduceren. Bits 1 tot 5 zijn het downlinkformaat, 17 voor ADS-B van een transponder. Bits 6 tot 8 zijn een capaciteitscode. Bits 9 tot 32 zijn het 24-bits ICAO-adres, de vaste identiteit van het vliegtuig. Bits 33 tot 88 zijn het berichtveld van 56 bits, waarvan de eerste vijf bits, de typecode, zeggen wat de overige 51 bevatten: een identificatiebericht (typecodes 1 tot 4) bevat de roepnaam van acht tekens als acht tekens van 6 bits; een positie in de lucht (9 tot 18) bevat 12 bits barometrische hoogte, een vlag die

aangeeft of dit een even of oneven bericht is, en elk 17 bits gecodeerde breedte- en lengtegraad; een snelheidsbericht (19) bevat de oost-west- en noord-zuidcomponent van de grondsnelheid, de verticale snelheid en het verschil tussen barometrische en geometrische hoogte. Bits 89 tot 112 zijn de pariteit van 24 bits. Laat het rekenwerk maken: 24 adresbits geven 2^24 = 16 777 216 vliegtuigen; acht tekens van 6 bits laten elk 64 symbolen toe, genoeg voor letters, cijfers en een spatie; 12 bits hoogte in stappen van 25 voet dekken 102 400 voet; en 17 bits breedtegraad zouden, naïef gebruikt over 180 graden, maar tot op 1,4 km nauwkeurig zijn, wat de vraag oproept die compact position reporting beantwoordt. Leg CPR in één alinea uit: de 17 bits geven de positie binnen een zone tot op een paar meter, maar niet welke zone het is; het vliegtuig wisselt af tussen twee zoneroosters, even en oneven, en een ontvanger die van elk één bericht heeft, kan de zone eenduidig bepalen en het vliegtuig daarna met losse berichten volgen. Het is een mooi voorbeeld van meer nauwkeurigheid uit dezelfde bits halen door tijd te gebruiken.



Geef de klas een echt bericht en laat het ontleden. De hexadecimale reeks 8D4840D6202CC371C32CE0576098 bestaat uit 28 hexadecimale cijfers, 112 bits. Als je de eerste twee cijfers, 8D, naar binair omzet, krijg je 10001 101: DF = 17, CA = 5. De volgende zes cijfers, 4840D6, zijn het ICAO-adres, dat de toewijzingstabellen aan Nederland toekennen. De cijfers daarna, 20 ..., beginnen met 00100, typecode 4, een identificatiebericht, en het decoderen van de tekens van 6 bits die volgen geeft de roepnaam KLM1023. De laatste zes cijfers, 576098, zijn de pariteit. Een klas met een spreadsheet of een paar regels Python kan het hele bericht in één les decoderen, en het beoogde resultaat is dat leerlingen een reeks hex kunnen nemen en zeggen: "dat is een KLM-toestel dat zijn vluchtnummer aankondigt".

> `8D` **`4840D6`** `202CC371C32CE0` `576098`
>
> 8D: downlinkformaat 17, capaciteit 5. 4840D6: ICAO-adres, toegewezen aan Nederland. 20...: typecode 4, identificatie, roepnaam KLM1023. 576098: de pariteit van 24 bits.

Sluit af met de pariteit, want dat is het informatica-idee dat het meest de moeite waard is om uit te werken. Boven een drukke luchthaven overlappen berichten van verschillende vliegtuigen elkaar voortdurend bij een ontvanger, en er gaan ook pulsen verloren in de ruis; een decoder zal onvermijdelijk verkeerde bits samenstellen. Het veld van 24 bits aan het eind is een cyclische redundantiecontrole: de 88 berichtbits worden behandeld als een lang binair getal en gedeeld, in een speciale rekenkunde waarin aftrekken exclusive-or is, door een vaste generator van 25 bits; de rest is de CRC. De ontvanger herhaalt de deling met de bits die hij heeft gedecodeerd en vergelijkt. Elke enkele beschadigde bit, elke twee, en elke reeks fouten tot 24 bits lang verandert de rest, zodat het beschadigde bericht wordt afgewezen. Demonstreer het idee op kleine schaal met een CRC van 4 bits op een bericht van 8 bits, met de hand uitgewerkt, of met het eenvoudigere voorbeeld van een controlecijfer op een streepjescode; laat de oudere groep dan de echte CRC-24 in een paar regels code implementeren en controleren dat de pariteit

van het voorbeeldbericht klopt, en dat het omklappen van één 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.

Uitgewerkt voorbeeld als opdracht
Hoe lang duurt een volledige uitzending, en als een transponder 4,5 extended squitters per seconde verstuurt, welk deel van de tijd zendt hij dan ADS-B uit? (120 microseconden; 540 microseconden per seconde, 0,054 procent.) Hoeveel vliegtuigen zouden het kanaal in principe kunnen delen voordat het onafgebroken bezet is, als je al het andere dat erop wordt uitgezonden buiten beschouwing laat? (Ongeveer 1 850, en daarom is congestie boven het drukste luchtruim een echt technisch probleem.)

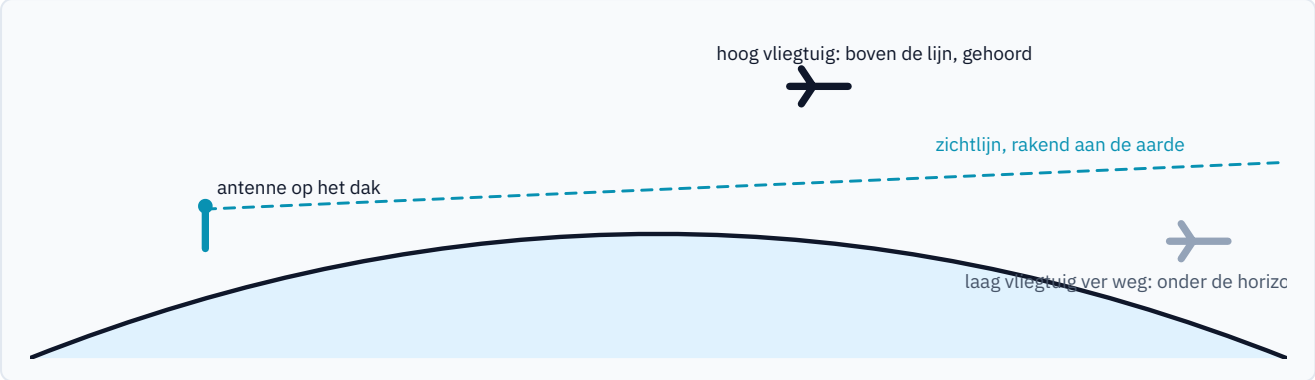
LES 4 - NATUURKUNDE

Voortplanting en bereik: de kromming van de aarde en de kwadratenwet

Hoe ver weg kan een ontvanger een vliegtuig horen? De vraag heeft twee onafhankelijke antwoorden, een meetkundig en een energetisch, en het doel van de les is ze allebei af te leiden en te ontdekken dat de ontwerpers ervoor hebben gezorgd dat ze overeenkomen. Neem eerst de meetkunde. Op 1090 MHz buigt radio niet bruikbaar om de aarde heen; hij gedraagt zich als licht en gaat in rechte lijnen. Een ontvanger kan dus alleen vliegtuigen boven zijn horizon horen, dat wil zeggen vliegtuigen van waaruit een rechte lijn naar de antenne niet door de grond gaat. Leid de horizonafstand samen met de klas af. Een antenne op hoogte h boven een bol met straal R ziet een horizon waar zijn zichtlijn de bol raakt. De raaklijn, de straal naar het raakpunt en de straal naar de antenne vormen een rechte hoek in het raakpunt, dus volgens Pythagoras d^2 + R^2 = (R + h)^2, wat d^2 = 2Rh + h^2 geeft. Omdat h piepklein is naast R, is d = sqrt(2Rh). Met R = 6 371 km en h in meter is d in kilometer = sqrt(2 x 6371 x h / 1000) = 3,57 sqrt(h). De dichtheid van de atmosfeer, en dus haar brekingsindex, neemt af met de hoogte, waardoor radiostralen een beetje naar beneden buigen; 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: 4,12 x (4,47 + 31,6) = 149 km. Vliegtuig op de startbaan 30 km verderop: 4,12 x (4,47 + 2) = 27 km, dus niet te horen.



Laat de klas d uitzetten tegen h2 voor de antennehoogte van hun eigen school; de kromme, eerst steil en dan afvlakkend, verklaart de vorm van de dekking van elke ontvanger: een cirkel van 400 km en meer voor verkeer op kruishoogte, een paar tientallen kilometers voor vliegtuigen in de nadering, en niets op de grond behalve op het vliegveld om de hoek. Ze verklaart ook waarom hoogte belangrijker is dan elke andere eigenschap van een ontvanger, en waarom een heuvel tussen u en de luchthaven, of de eigen vleugel van het vliegtuig als het wegdraait, een spoor meteen afbreekt. De speelplaatsdemonstratie uit de cursus voor het basisonderwijs, verder kunnen kijken vanaf een bank dan gehurkt, is niet beneden de waardigheid van deze leeftijdsgroep als u er de afleiding op laat volgen; het punt is dat ze nu weten waarom.

Nu de energie. Een transponder straalt een piekvermogen van 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 de klas moet afleiden uit de oppervlakte van de bol in plaats van uit het hoofd te leren. Twee keer de afstand, een kwart van het vermogen; tien keer, een honderdste. Radio-ingenieurs drukken het verlies tussen een isotrope zender en een isotrope ontvanger uit in decibel, en de standaardformule, die de oudere groep op gezag kan aannemen of kan afleiden uit de effectieve oppervlakte van een antenne, lambda^2 / 4 pi, is:

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

Op 400 km en 1090 MHz: 20 x 2,60 + 20 x 3,04 + 32,44 = 52,0 + 60,7 + 32,4 = 145 dB. Een zender van 250 W is +54 dBm; het ontvangen vermogen is 54 - 145 = -91 dBm, ongeveer 8 x 10^-13 W, of een miljoenste van een miljoenste watt.

Besteed een paar minuten aan decibels als de klas ze nog niet kent, omdat ze een vermenigvuldiging over veertien ordes van grootte veranderen in een optelling, en omdat het getal zelf leerzaam is: een ontvanger op een dak detecteert een signaal dat 10^14,5 keer zwakker is dan het signaal dat het vliegtuig verliet. Een goede hobbyontvanger kan decoderen tot ongeveer -100 dBm, dus op 400 km is er ongeveer 9 dB marge, wat wil zeggen dat de energiegrens en de meetkundige horizon van een verkeersvliegtuig op kruishoogte op dezelfde plek liggen. Dat is geen toeval; het vermogen van transponders en de normen voor ontvangers zijn zo vastgelegd dat een vliegtuig tot aan de horizon te horen is en niet veel verder, zodat het kanaal niet wordt overspoeld door uitzendingen uit het buurland.

Twee verfijningen voor de oudere groep. Ten eerste Doppler: een vliegtuig dat met 250 m/s nadert, verschuift de ontvangen frequentie met f x v / c = 1,09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz, minder dan een miljoenste van de draaggolf, wat een ontvanger nooit merkt; vergelijk dat met de hoorbare dopplerverschuiving van het geluid van het vliegtuig, waarbij v / c gelijk is aan 250 / 343 en de toonhoogte bij het voorbijvliegen bijna een octaaf verandert. Ten tweede de looptijd van het signaal: 400 km met c duurt 1,33 ms, dus de positie in het bericht is al 1,33 ms oud, en in die tijd heeft het vliegtuig 33 cm afgelegd; verwaarloosbaar voor een kaart, beslissend voor de multilateratie van les 2, die precies op deze microseconden draait.

Uitgewerkt voorbeeld als opdracht
Een ontvanger op een mast van 10 m hoort een vliegtuig op kruishoogte op 11 000 m, maar niet een licht vliegtuig op 600 m dat 130 km verderop vliegt. Staat het lichte vliegtuig onder de horizon? (Horizon: 4,12 x (3,16 + 24,5) = 114 km, dus ja.) Hoe hoog zou de ontvanger moeten staan om het te horen? (Nodig: 4,12 x (sqrt(h1) + 24,5) = 130, dus sqrt(h1) = 7,05, h1 = 50 m.)

LES 5 - NATUURKUNDE EN TECHNIEK

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; de ontvangstantenne en de zendantenne zijn hetzelfde apparaat, in tegengestelde richting gebruikt, een wederkerigheid die u de klas expliciet moet vertellen. De opgewekte stroom is het grootst als de geleider resoneert: als zijn lengte zodanig is dat de stroomverdeling erlangs past bij de trilling van de golf, precies zoals een snaar met de juiste lengte meetrilt met een bepaalde toon, of een schommel met een bepaald ritme van duwen. 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 het vliegtuig en op de meeste ontvangers, is een kwartgolf-monopool: een verticaal element van 6,9 cm op een geleidend grondvlak, dat het elektrisch 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 om de gevoeligheid richting de horizon te concentreren. Een model dat in de klas wordt gebouwd uit een staafje van 6,9 cm op een blikken deksel, toont de vorm en de lengte, met een liniaal gemeten tegen de golf van 27,5 cm; de ontvanger van het project gebruikt echter de in de fabriek afgestemde antenne, omdat een paar millimeter fout een zelfgemaakte antenne ontstemt en ze dan maar een deel van de lucht hoort.

Werk het stralingspatroon uit, want dat voorspelt iets wat de klas kan waarnemen. Een verticale monopool zendt en ontvangt het sterkst richting de horizon en helemaal niet langs zijn eigen as; zijn gevoeligheid, in drie dimensies uitgezet, is een donut met de antenne door het gat. Een ontvanger hoort dus doorgaans vliegtuigen op 300 km afstand perfect en verliest er een die recht boven hem overvliegt een paar seconden, en de klas kan dat op de eigen ontvanger zien gebeuren. Een collineaire antenne, met meerdere resonerende elementen boven elkaar, drukt de donut platter en verhoogt de gevoeligheid aan de horizon, waar de verre vliegtuigen zijn, ten koste van het gat erboven: dat is antennewinst, uitgedrukt in dBi, en die ontstaat door gevoeligheid te herverdelen, nooit door ze te creëren. Polarisatie, uit les 1, krijgt nu een praktisch gevolg dat het project zal toetsen: de antenne moet verticaal staan.

Tussen de antenne en de computer zitten drie stappen, elk een kleine les op zich. Een banddoorlaatfilter laat 1090 MHz door en houdt de veel sterkere uitzendingen van mobiele telefonie een paar honderd megahertz verderop tegen, die anders de versterker zouden verzadigen. Een ruisarme versterker, bij de antenne geplaatst in plaats van bij de ontvanger, vermenigvuldigt het signaal duizend keer voordat het de kabel in gaat; de volgorde doet ertoe, want een coaxkabel verliest op 1090 MHz ongeveer de helft van het signaal, 3 dB, per tien meter, en versterken na het verlies zou de ruis van de kabel samen met het signaal versterken. Dan de software-defined radio: een USB-apparaatje van 20 euro dat oorspronkelijk als tv-tuner is gemaakt, het signaal naar de basisband mengt en het twee miljoen keer per seconde bemonstert tot een stroom getallen. Vanaf dat punt is het radioprobleem een programmeerprobleem. Gratis software doorzoekt de stroom samples naar het preambulepatroon, 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 identificatie samen per ICAO-adres en houdt de toestand van elk vliegtuig bij tot er geen berichten meer binnenkomen.

Geef de keten aan de klas als een schema dat ze zelf tekenen, met de grootheid bij elke stap: nanovolts wisselstroom bij de antenne; microvolts na de versterker; twee miljoen getallen van 8 bits per seconde uit de SDR; berichten van 112 bits uit de decoder, misschien een paar honderd per seconde; één record per vliegtuig uit de tracker. Het punt dat moet blijven hangen, is dat een stip op een kaart het uiteinde is van een keten waarin elke schakel een idee is dat ze nu begrijpen: resonantie, filteren, versterken, bemonsteren, patronen herkennen, decoderen, foutcontrole, samenvoegen.

Uitgewerkt voorbeeld als opdracht
Een kabel verliest 3 dB per 10 m op 1090 MHz. Welk deel van het signaal verliest een kabel van 20 m dan? (6 dB, drie kwart.) Als de grens van de ontvanger -100 dBm is en het signaal bij de antenne van een vliegtuig op 400 km -91 dBm, overleeft het signaal de kabel dan zonder versterker? (Net: -97 dBm. Bij elk extra verlies, regen op de connectoren of een langere kabel, verdwijnt het vliegtuig aan de horizon. Daarom zit de versterker bij de antenne.)

PROJECT - TWEE TOT VIER WEKEN

Bouw een ontvanger en toets de natuurkunde aan de lucht

Het project zet de vijf lessen om in metingen. De uitrusting bestaat uit een USB-dongle voor software-defined radio (ongeveer 25 euro), een in de fabriek afgestemde 1090 MHz-antenne (50 tot 70 euro), een paar meter coaxkabel en een laptop of een Raspberry Pi met een van de gratis decoders (dump1090 en zijn opvolgers zijn de standaard). De installatie kost een middag, en binnen enkele minuten toont de software een tabel met vliegtuigen, met hun ICAO-adressen, roepnamen, posities, hoogtes en snelheden, en een kaart. Het hele project is alleen ontvangen; er wordt niets uitgezonden, en de klas moet begrijpen dat uitzenden op luchtvaartfrequenties zowel illegaal als gevaarlijk zou zijn. Voor toegang tot het dak is de gebruikelijke toestemming van de school nodig; een raam op een hogere verdieping dat uitkijkt op de belangrijkste verkeersstromen is een prima begin. De pagina Word feeder op deze site beschrijft dezelfde installatie stap voor stap en laat de ontvanger van de school de livekaart voeden.

Het eerste onderzoek gaat over de radiohorizon. De decoder geeft voor elk vliegtuig de afstand en de hoogte waarop het het laatst is gehoord. Verzamel over een dag het maximale bereik waarop vliegtuigen in verschillende hoogtebanden zijn ontvangen en zet het bereik uit tegen de hoogte. De leerlingen hebben de formule uit les 4 en de antennehoogte; ze moeten de kromme voorspellen voordat ze de gegevens zien, en dan vergelijken. De overeenkomst is meestal goed voor hoge vliegtuigen en slechter voor lage, en de discussie over het waarom (gebouwen, terrein, het gat boven de antenne, de eigen afscherming van het vliegtuig) is het soort confrontatie tussen theorie en meting dat een schoolboek niet kan bieden. Een kaart van de verste vliegtuigen die in elke richting zijn gehoord, die de software tekent, toont het terrein van de hele regio als schaduwen in de dekking.

Het tweede gaat over de antenne. Vergelijk het aantal berichten en het maximale bereik met de antenne binnen, bij een raam en op het dak; verticaal en plat gelegd; staand op een metalen oppervlak en weg van elk metaal gehouden. Elke vergelijking toetst een specifieke bewering uit de lessen 1 en 5, en elk resultaat moet eerst worden voorspeld. De polarisatietest is het opvallendst: plat gelegd verliest de antenne de meeste van haar vliegtuigen.

Het derde gaat over gegevens. Registreer een volledige dag verkeer en stel er vragen over: het drukste uur, de verdeling van de kruishoogtes (leerlingen verwachten een grote spreiding en ontdekken dat de meeste verkeersvliegtuigen tussen 10 000 en 12 000 m vliegen), de klimsnelheid van vertrekkende vliegtuigen van de dichtstbijzijnde luchthaven, de landen waarvan de vliegtuigen het vaakst overkomen (uit de toewijzing van de ICAO-adressen). De oudere groep kan ruwe berichten zelf decoderen, uit de hex die de software vastlegt, en de CRC met eigen code controleren. Een klas met een tweede ontvanger op een partnerschool op 30 km of meer afstand, beide met GNSS-tijdstempels, kan een tweedimensionale multilateratie proberen van een vliegtuig dat beide horen en die vergelijken met de positie die het vliegtuig uitzond: het meest ambitieuze resultaat van de cursus, en een echt resultaat.

Sluit af met de vragen die het systeem oproept maar niet beantwoordt. De berichten zijn niet ondertekend, dus een zender zou een spookvliegtuig kunnen uitzenden; wat beschermt het systeem, en wat zou een ondertekende versie kosten? Het vliegtuig is afhankelijk van satellieten die gestoord kunnen worden; wat gebeurt er met het beeld van een verkeersleider als dat gebeurt? De gegevens identificeren vliegtuigen, en een vliegtuig kan een persoon identificeren; wie zou wie mogen volgen? Een klas die de ontvanger heeft gebouwd, heeft deze vragen verdiend, en ze vormen een goed slotessay of debat.

Antwoorden op de uitdagingen van de leerling

De leerlingenpagina bevat acht uitdagingen, één of twee per les, die u als huiswerk of als eindtoets kunt gebruiken. De antwoorden, met de redenering die een antwoord met volle punten moet bevatten:

1. Golflengte op 1090 MHz: lambda = c / f = 3,00 x 10^8 / 1,09 x 10^9 = 0,275 m. Kwartgolfelement: 6,9 cm. Redenering: c = f x lambda, waarbij de vaste lichtsnelheid een omgekeerd verband afdwingt.
2. Licht is 3,00 x 10^8 / 343 keer sneller dan geluid, ongeveer 875 000 keer. Over 30 km doet het bericht 100 microseconden en het geluid 87 s; het vliegtuig legt met 250 m/s in die tijd 22 km af.
3. Een klokfout van 2 microseconden geeft een afstandsfout van 2 x 10^-6 x 3 x 10^8 = 600 m. Er zijn vier satellieten nodig omdat de klokafwijking van de ontvanger een vierde onbekende is naast x, y en z.

4. 2^24 = 16 777 216 adressen. Een bericht van 112 bits met 1 bit per microseconde duurt 112 microseconden, 120 met de preambule.
5. In 8D4840D6… is 8D gelijk aan 10001101: de eerste vijf bits 10001 zijn 17, dus DF = 17, een ADS-B-bericht van een Mode S-transponder; de volgende drie, 101, geven CA = 5. 4840D6 is het ICAO-adres.
6. Radiohorizon van een antenne op 15 m naar een vliegtuig op 9 000 m: 4,12 x (3,87 + 94,9) = 407 km. Voor een vliegtuig op 300 m: 4,12 x (3,87 + 17,3) = 87 km.
7. Een verdubbeling van de afstand maakt het ontvangen vermogen vier keer kleiner, omdat hetzelfde uitgezonden vermogen over een bol met vier keer de oppervlakte wordt verdeeld. Vrije-ruimteverzwakking op 200 km en 1090 MHz: 20 x 2,30 + 60,7 + 32,4 = 139 dB, 6 dB minder dan op 400 km, in overeenstemming met een factor vier.
8. Een horizontaal gelegde antenne is kruisgepolariseerd ten opzichte van de verticaal gepolariseerde golf en ontvangt heel weinig; de opgewekte stroom hangt af van de component van het elektrische veld langs de geleider. Een ontvanger op de begane grond verliest bereik omdat zijn horizonafstand, 4,12 x sqrt(h1), kleiner wordt, en omdat gebouwen de zichtlijn blokkeren.

VOLGENDE STAP

Het project, stap voor stap

Het project van les 6 ging uit van een ontvanger; de praktische workshop bouwt hem. Hij is geschreven voor iemand die nog nooit een Raspberry Pi heeft gebruikt: de boodschappenlijst met prijzen, welke antenne u kiest, waar u haar plaatst en het kabelverlies, het voorbereiden van de Pi, de drie commando's die de Dataero-feeder installeren, het claimen van het station, het afstellen van de versterking, en vijf metingen, één per les, die de natuurkunde toetsen aan de lucht. Een station dat Dataero voedt, geeft de klas een dashboard, een dekkingskaart en een jaar geschiedenis om mee te werken.

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