

PHYSIK UND INFORMATIK - 12 BIS 18 JAHRE

Den Himmel entschlüsseln

Die Zeile Hexadezimalzahlen unten ist eine echte Nachricht, gesendet von einem echten Flugzeug, etwa zweimal pro Sekunde. In 112 millionstel Sekunden verkündet sie, wer das Flugzeug ist, und in ihren Begleitnachrichten, wo es ist, wie hoch und wie schnell es fliegt. Dieser Kurs erarbeitet alles, was du brauchst, um sie zu verstehen: die Physik der Welle, auf der sie reitet, die Zeitmessung, die dem Flugzeug seine Position liefert, die Codierung, die alles in 112 Bit packt, die Geometrie, die begrenzt, wie weit sie zu hören ist, und den Empfänger, den du bauen kannst, um sie selbst zu hören.

Lernen - <https://radar.dataero.eu/de/learning/ages-12-18/student> 2026-10-22

INHALT

Was ADS-B ist, auf einer Seite

STUNDE 1 Die Welle: Funk als unsichtbares Licht

STUNDE 2 Zeit und Position: wie das Flugzeug weiß, wo es ist

STUNDE 3 Die Nachricht: 112 Bit und wie Fehler erkannt werden

STUNDE 4 Reichweite: die Erdkrümmung und das Abstandsquadratgesetz

STUNDE 5 Antennen und Empfänger: von einer 27-Zentimeter-Welle zum Punkt auf der Karte

Aufgaben

ALS NÄCHSTES Bau ihn

Was ADS-B ist, auf einer Seite

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

Ein Extended Squitter, wie ihn ein Empfänger aufzeichnet: 28 Hexadezimalziffern, 112 Bit. Ab Stunde 3 kannst du jedes Feld davon lesen.

Die Flugsicherung muss ununterbrochen wissen, wo jedes Flugzeug ist, um sie voneinander fernzuhalten: Ein Verkehrsflugzeug im Reiseflug legt jede Sekunde 250 m zurück, und die Staffelungsregeln verlangen zwischen radarüberwachten Flugzeugen 300 m vertikal oder 9 km horizontal. Siebzig Jahre lang erfuhr man das per Radar: Eine Bodenstation sendet einen Impuls und misst die Laufzeit des Echos, oder sie fragt in der verbesserten Sekundärform einen Transponder an Bord ab, der auf 1090 MHz mit einer Kennung und einer Höhe antwortet. Radar hat Grenzen: Es braucht enorme Leistung, sieht jedes Flugzeug nur einmal pro Antennenumdrehung und kann weder Ozeane noch Gebirge abdecken.

ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, dreht das Problem um. Jedes moderne Flugzeug hat einen Satellitennavigationsempfänger an Bord und kennt deshalb seine eigene Position auf wenige Meter genau. Bei ADS-B gibt der Transponder des Flugzeugs diese Position einfach bekannt, zusammen mit Kennung, Höhe und Geschwindigkeit, etwa zweimal pro Sekunde, auf 1090 MHz, an niemand Bestimmten. Automatic, weil nichts sie auslöst; dependent (abhängig), weil die Informationen

vollständig von den eigenen Instrumenten des Flugzeugs stammen; surveillance (Überwachung), weil ihr Zweck ist zu wissen, wo Flugzeuge sind; broadcast (Rundsendung), weil sie unverschlüsselt an jeden gesendet wird, der zuhört. Seit 2020 ist es für die meisten Flugzeuge im europäischen und amerikanischen Luftraum Pflicht. Fluglotsen nutzen es neben dem Radar, andere Flugzeuge nutzen es, um einander zu sehen, und ein USB-Empfänger für 25 Euro auf einem Schuldach hört genau dieselben Nachrichten.

Um das System zu verstehen, musst du fünf Dinge verstehen, und jedes ist eine Stunde: die elektromagnetische Welle, die die Nachricht trägt; die Zeitmessung, die dem Flugzeug seine Position liefert und mit der ein Netzwerk ein Flugzeug orten kann, das nicht sagt, wo es ist; die digitale Nachricht und wie Fehler darin erkannt werden; die Geometrie und Energie, die begrenzen, wie weit sie zu hören ist; und die Antenne und den Empfänger, die sie wieder in Daten verwandeln. Die vollständige Darstellung steht im Referenzkurs; lies dessen Kapitel 3 und 5 vor Stunde 3 und die Kapitel 6 bis 8 vor Stunde 4 und 5.

STUNDE 1

Die Welle: Funk als unsichtbares Licht

Die Nachricht verlässt das Flugzeug als elektromagnetische Welle: schwingende elektrische und magnetische Felder, die sich ohne Medium durch den Raum ausbreiten, mit Lichtgeschwindigkeit $c = 3,00 \times 10^8$ m/s. Sichtbares Licht ist dasselbe Phänomen bei höherer Frequenz; deine Augen reagieren auf etwa 4 bis 8×10^{14} Hz, während ADS-B mit $1,09 \times 10^9$ Hz gesendet wird, eine halbe Million Mal niedriger. Zwischen der Nachricht des Flugzeugs und dem Licht dieses Bildschirms gibt es keinen grundsätzlichen Unterschied, nur einen in der Frequenz.

Da sich die Welle mit fester Geschwindigkeit ausbreitet, bestimmt ihre Frequenz ihre Wellenlänge. In einer Sekunde kommt die Welle c Meter voran und vollführt f Schwingungen, also nimmt jede Schwingung c / f Meter ein: $c = f \times \lambda$. Für ADS-B gilt $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. Die Welle zwischen einem Flugzeug und deiner Antenne hat Wellenberge im Abstand von 27,5 cm und liegt im Spektrum zwischen einem Handysignal (17 cm) und einem UKW-Radiosender (3 m). Zeichne dieses Spektrum selbst, auf einer logarithmischen Achse von 10^6 Hz bis 10^{18} Hz, und trage UKW-Radio, ADS-B, Mobilfunk, WLAN, Infrarot, sichtbares Licht und Röntgenstrahlen ein. Die Welle des Flugzeugs liegt mitten zwischen den Dingen in deiner Hosentasche.

$$c = f \times \lambda$$

$$3,00 \times 10^8 \text{ m/s} = 1,09 \times 10^9 \text{ Hz} \times 0,275 \text{ m}$$

Was eine Funkwelle nicht ist, ist Schall. Schall ist eine Druckwelle in einem Medium, die sich in Luft mit 343 m/s ausbreitet, in Wasser mit 1.500 m/s und im Vakuum überhaupt nicht. Funk ist Licht: Er braucht kein Medium - so durchquert er das Vakuum vom Satelliten zum Flugzeug - und ist um den Faktor $3,00 \times 10^8 / 343$ schneller, etwa 875.000. Wenn ein Flugzeug in 30 km Entfernung im selben Augenblick ein Geräusch und eine Nachricht aussendet, kommt die Nachricht nach 100 Mikrosekunden an; das Geräusch 87 Sekunden später, und bis dahin ist das Flugzeug 22 km weitergeflogen. Eine Seilwelle hat

mit Licht die Eigenschaften gemeinsam, auf die es ankommt - eine Wellenlänge, eine Frequenz und eine feste Geschwindigkeit -, sodass schnelleres Schütteln kürzere Wellen bedeutet und nicht schnellere; sie unterscheidet sich darin, dass sie das Seil braucht.

Eine Eigenschaft der Welle wird in Stunde 5 wichtig: ihre Polarisation. Das elektrische Feld schwingt in einer bestimmten Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Flugzeugantennen sind senkrecht, also ist die ADS-B-Welle vertikal polarisiert, und eine auf die Seite gelegte Empfangsantenne fängt fast nichts davon auf - so wie eine senkrecht geschüttelte Seilwelle von einem waagerechten Schlitz gestoppt wird. Sag jetzt voraus, was mit der Reichweite deines Empfängers passiert, wenn die Antenne waagerecht liegt; im Projekt wirst du es testen.

STUNDE 2

Zeit und Position: wie das Flugzeug weiß, wo es ist

Die Position in jeder ADS-B-Nachricht stammt aus der Satellitennavigation, und Satellitennavigation ist eine Zeitmessung. Rund dreißig Satelliten pro System (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) umkreisen die Erde in etwa 20.200 km Höhe, jeder mit einer Atomuhr, jeder sendet ein Signal, das seine eigene Position und den genauen Sendezeitpunkt angibt. Der Empfänger im Flugzeug notiert den Ankunftszeitpunkt. Die Differenz, multipliziert mit c , ist die Entfernung zu diesem Satelliten; von direkt oben braucht das Signal $20.200 / 300.000 = 0,0673$ s. Eine Entfernung legt den Empfänger auf eine Kugel um diesen Satelliten; zwei Kugeln schneiden sich in einem Kreis; drei in zwei Punkten, von denen einer weit von der Erde entfernt liegt und verworfen wird. Drei Satelliten würden genügen, wenn der Empfänger eine perfekte Uhr hätte. Er hat aber einen Quarzkristall, der um Mikrosekunden driftet, und eine Mikrosekunde entspricht 300 m Entfernung. Deshalb behandelt der Empfänger seinen eigenen Uhrenfehler als vierte Unbekannte und nutzt einen vierten Satelliten: vier Gleichungen, vier Unbekannte (x , y , z und die Uhrenabweichung), laufend gelöst. Als Nebenprodukt hält jeder Satellitenempfänger die Zeit auf einige zehn Nanosekunden genau, und davon hängt die zweite Hälfte dieser Stunde ab.

Merk dir die Größenordnungen: Licht legt 0,3 m pro Nanosekunde und 300 m pro Mikrosekunde zurück. Eine auf 3 m genaue Position bedeutet eine auf 10 ns genaue Zeitmessung. Ein Satellit, dessen Uhr 1 Mikrosekunde voringe, würde jeden Empfänger, der ihn nutzt, um 300 m entlang der Linie zu ihm hin verschieben - deshalb werden die Satellitenuhren mehrmals am Tag vom Boden aus korrigiert.

Das Flugzeug kennt zwei Höhen. Die Satellitenlösung liefert eine geometrische Höhe über dem Referenzellipsoid. Die Höhe, die es für die Flugsicherung sendet, ist jedoch barometrisch: der Luftdruck an einer Öffnung am Rumpf, umgerechnet in eine Höhe über die Internationale Standardatmosphäre, die auf Meereshöhe 1013,25 hPa und 15 Grad C sowie eine Abnahme von 6,5 Grad pro Kilometer annimmt. Weicht der tatsächliche Druck vom Standard ab, ist die barometrische Höhe jedes Flugzeugs um denselben Betrag falsch - und genau das braucht die Staffelung: Zwei Flugzeuge, die Flugfläche 350 und 360 anzeigen, sind bei jedem Wetter 1.000 ft voneinander entfernt. Die Positionsnachricht enthält die barometrische Höhe in Schritten von 25 Fuß; die Geschwindigkeitsnachricht enthält die Differenz zwischen barometrischer und geometrischer Höhe. Wenn du eine Tabellenkalkulation hast, löse $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ auf und prüfe, dass der Druck in 11.000 m etwa 227 hPa beträgt, weniger als ein Viertel des Werts auf Meereshöhe: In der Luft, durch die ein Verkehrsflugzeug fliegt, würdest du nicht bei Bewusstsein bleiben.

Jetzt dreh die ganze Idee um. Manche Flugzeuge senden auf 1090 MHz ohne Position: alte Transponder, die dem Radar nur mit Kennung und Höhe antworten, oder Flugzeuge, deren Satellitenempfang gestört wird. Ein Netzwerk von Empfängern kann sie trotzdem per Multilateration orten. Angenommen, vier Empfänger mit synchronisierten Uhren zeichnen jeweils die Ankunftszeit derselben Aussendung auf. Eine Nachricht, die Empfänger A eine Mikrosekunde vor Empfänger B erreicht hat, wurde von einem Punkt gesendet, der 300 m näher an A als an B liegt, und alle solchen Punkte bilden ein Hyperboloid mit A und B als Brennpunkten. Drei unabhängige Paare aus vier Empfängern ergeben drei Hyperboloide, die sich im Flugzeug schneiden. Es ist das Satellitenproblem mit vertauschtem Bekanntem und Unbekanntem: dort ein Empfänger und vier bekannte Sender, hier ein Sender und vier bekannte Empfänger. In beiden Fällen wird Zeit gemessen, und 1 Mikrosekunde sind 300 m. Die Empfänger synchronisieren ihre Uhren auf etwa 100 ns genau über dieselben Satelliten, die auch das Flugzeug nutzt.

Du kannst es mit Schall ausprobieren. Drei Personen mit Stoppuhren an vermessenen Punkten auf einem Sportplatz; eine vierte, versteckt, klatscht einmal; jede notiert die Verzögerung. Bei Schall mit 343 m/s sind 0,1 s Unterschied 34 m, und eine maßstabsgetreue Zeichnung mit Probepositionen oder eine Skizze der Hyperbeln findet die klatschende Person. Frag dich dann, welche Genauigkeit die Stoppuhren bräuchten, um dasselbe mit Funk über 200 km zu schaffen, und du verstehst, warum das Netzwerk Atomzeit braucht.

STUNDE 3

Die Nachricht: 112 Bit und wie Fehler erkannt werden

Der Transponder sendet ADS-B als Mode-S-Extended-Squitter: eine 8 Mikrosekunden lange Präambel, dann 112 Datenbits mit einem Bit pro Mikrosekunde. Die Präambel ist ein festes Muster aus vier Impulsen bei 0, 1, 3,5 und 4,5 Mikrosekunden, und ihre Aufgabe ist es, eine Frage zu beantworten, an die du vielleicht gar nicht gedacht hast: Woher weiß ein Empfänger in einem Kanal voller Rauschen und anderer Flugzeuge, dass eine Nachricht begonnen hat und wann jedes Bit beginnt? Der Decoder hält ununterbrochen nach diesem Muster Ausschau, und wenn er es sieht, weiß er beides. Jedes digitale Protokoll, das du benutzt, vom WLAN bis zum QR-Code, hat etwas Entsprechendes.

Ein Sender kann ein- oder ausgeschaltet sein; wie sendet er eine 1 oder eine 0? ADS-B nutzt Pulspositionsmodulation. Jeder Bit-Slot von einer Mikrosekunde ist in zwei Hälften geteilt: ein Impuls in der ersten Hälfte und Stille in der zweiten ist eine 1; Stille und dann ein Impuls ist eine 0. Es gibt immer genau einen Impuls pro Bit. Überleg, warum das besser ist als „Impuls heißt 1, kein Impuls heißt 0“. Der Empfänger verliert nie seinen Takt, selbst bei einer langen Folge von Nullen, die im naiven Schema nicht von Stille zu unterscheiden wäre. Und er entscheidet jedes Bit, indem er fragt, welche Hälfte lauter war, statt ob ein Impuls einen festen Pegel überschritten hat - so wird ein schwaches Signal aus 400 km genauso zuverlässig decodiert wie ein starkes von direkt oben.

Vier Bits in Pulspositionsmodulation: 1, 0, 1, 1



Jeder Slot dauert 1 Mikrosekunde. Impuls in der ersten Hälfte: 1. Impuls in der zweiten Hälfte: 0.

Die 112 Bit sind wie folgt aufgebaut, und du solltest das aus dem Gedächtnis wiedergeben können. Bits 1 bis 5: das Downlink-Format, 17 für ADS-B von einem Transponder. Bits 6 bis 8: ein Capability-Code. Bits 9 bis 32: die 24-Bit-ICAO-Adresse, die dauerhafte Kennung des Flugzeugs, bei der Zulassung vergeben; es gibt $2^{24} = 16.777.216$ davon, in Blöcken an Staaten verteilt - Belgiens Block reicht hexadezimal von 448000 bis 44FFFF. Bits 33 bis 88: das 56-Bit-Nachrichtenfeld, dessen erste fünf Bits, der Typcode, angeben, was die übrigen 51 enthalten. Die Typcodes 1 bis 4 enthalten das Rufzeichen als acht 6-Bit-Zeichen mit je 64 möglichen Symbolen. Die Typcodes 9 bis 18 enthalten eine Position in der Luft: 12 Bit barometrische Höhe in Schritten von 25 Fuß, ein Gerade/Ungerade-Flag und je 17 Bit codierte Breite und Länge. Typcode 19 enthält die Geschwindigkeit als Ost-West- und Nord-Süd-Komponente der Geschwindigkeit über Grund, die Steig- bzw. Sinkrate und die Differenz zwischen barometrischer und geometrischer Höhe. Bits 89 bis 112: die 24-Bit-Parität. Prüf die Rechnung nach: 12 Bit Höhe in Schritten von 25 ft decken 102.400 ft ab; 17 Bit, naiv über 180 Grad Breite verteilt, würden nur 1,4 km auflösen. Die Position ist besser als das, dank Compact Position Reporting: Die 17 Bit geben die Position innerhalb einer Zone auf wenige Meter genau an, aber nicht, welche Zone, und das Flugzeug wechselt zwischen zwei Zonenrastern ab, gerade und ungerade. Ein Empfänger, der von jedem eine gehört hat, bestimmt die Zone eindeutig und verfolgt das Flugzeug dann mit einzelnen Nachrichten weiter. Mehr Genauigkeit aus denselben Bits, erkauft mit Zeit.

DF 5 Bit Downlink-Format	CA 3 Bit Capability	ICAO-Adresse 24 Bit eindeutige Kennung des Flugzeugs	ME - die Nutzdaten 56 Bit Position, Höhe, Geschwindigkeit, Rufzeichen oder Status, je nach Typcode in den ersten 5 Bit	PI 24 Bit Fehlerprüfung (CRC)
---------------------------------------	----------------------------------	---	---	--

Zerleg die echte Nachricht oben auf dieser Seite. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 besteht aus 28 Hexadezimalziffern, 112 Bit. Die ersten beiden Ziffern, 8D, sind binär 1000 1101; die ersten fünf Bits, 10001, ergeben 17, also ist das ADS-B von einem Transponder, und die nächsten drei, 101, ergeben Capability 5. Die nächsten sechs Ziffern, 4840D6, sind die ICAO-Adresse, die die Zuteilungstabellen den Niederlanden zuordnen. Das nächste Ziffern paar, 20, beginnt mit 00100, Typcode 4, eine Identifikationsnachricht, und das Decodieren der folgenden 6-Bit-Zeichen ergibt das Rufzeichen KLM1023. Die letzten sechs Ziffern, 576098, sind die Parität. Mit einer Tabellenkalkulation oder ein paar Zeilen Code kannst du die ganze Decodierung selbst durchführen, und das Ziel dieser Stunde ist, eine Zeile Hex anzuschauen und sagen zu können: „Ein KLM-Flugzeug, das Flug 1023 meldet.“

Die Parität verdient das meiste Nachdenken. Über einem belebten Flughafen überlagern sich die Aussendungen verschiedener Flugzeuge an einem Empfänger ständig, und einzelne Impulse gehen im Rauschen verloren; ein Decoder setzt zwangsläufig manchmal falsche Bits zusammen. Die letzten 24 Bit sind eine zyklische Redundanzprüfung: Die 88 Nachrichtenbits werden als eine lange Binärzahl behandelt und in einer Arithmetik, in der die Subtraktion ein exklusives Oder ist, durch ein festes 25-Bit-Generatorpolynom geteilt; der Rest ist der CRC. Der Empfänger wiederholt die Division mit den Bits, die er decodiert hat. Jedes einzelne gekippte Bit, jedes Paar und jedes Fehlerbündel bis zu 24 Bit Länge verändert den Rest, und die Nachricht wird verworfen. Probier einen 4-Bit-CRC an einer 8-Bit-Nachricht von Hand aus, um den Mechanismus zu sehen, und wenn du programmierst, implementiere den echten CRC-24 und überprüfe, dass die Beispielnachricht die Prüfung besteht und dass das Kippen eines

beliebigen Bits sie scheitern lässt. Das ist Fehlererkennung, wie sie jedes moderne System betreibt - in einem Umfeld, in dem ein übersehener Fehler ein Phantomflugzeug auf den Bildschirm eines Fluglotsen bringen könnte.

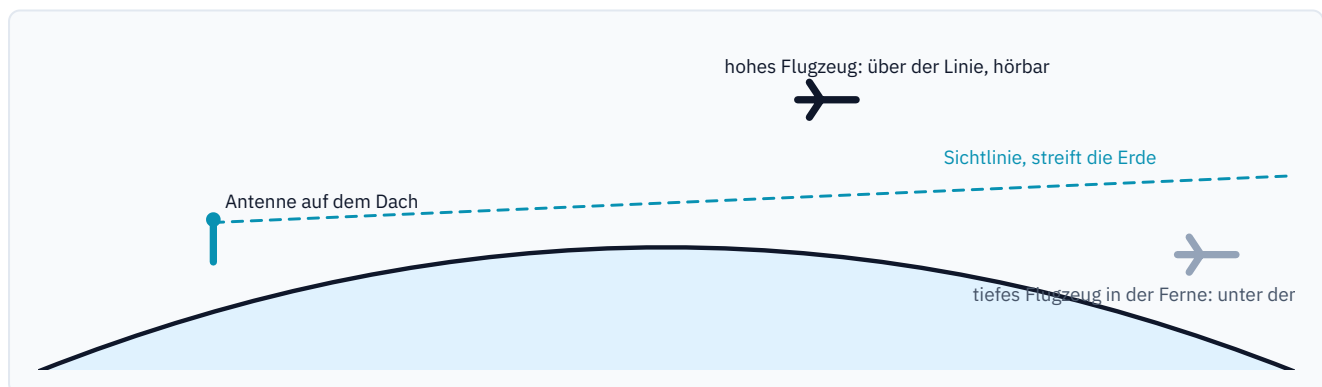
STUNDE 4

Reichweite: die Erdkrümmung und das Abstandsquadratgesetz

Aus welcher Entfernung kann ein Empfänger ein Flugzeug hören? Es gelten zwei verschiedene Grenzen, und es lohnt sich, sie auseinanderzuhalten. Die erste ist geometrisch. Bei 1090 MHz biegt sich Funk nicht um die Erde herum; er breitet sich geradlinig aus, also hört ein Empfänger nur Flugzeuge über seinem Horizont - jene, von denen aus eine gerade Linie zur Antenne über den Boden hinwegführt. Leite die Horizontentfernung her. Eine Antenne in der Höhe h über einer Kugel mit dem Radius R sieht einen Horizont dort, wo ihre Sichtlinie die Kugel berührt; die Tangente und die beiden Radien bilden am Berührungspunkt einen rechten Winkel, also gilt $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, woraus $d^2 = 2Rh + h^2$ folgt, und da h gegenüber R vernachlässigbar ist, $d = \sqrt{2Rh}$. Mit $R = 6.371$ km und h in Metern gilt d (km) = $3,57 \sqrt{h}$. Die Atmosphäre biegt Funk leicht nach unten, weil ihr Brechungsindex mit der Höhe abnimmt; die Standardkorrektur behandelt die Erde so, als hätte sie vier Drittel ihres wahren Radius, und ersetzt 3,57 durch 4,12. Die gesamte Sichtlinie von einer Antenne in h_1 zu einem Flugzeug in h_2 ist die Summe der beiden Horizontentfernungen:

$$d \text{ (km)} = 4,12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad \text{mit } h_1, h_2 \text{ in Metern}$$

Antenne auf einem 20 m hohen Dach, Flugzeug in 11.000 m: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451$ km. Dieselbe Antenne, Flugzeug in 1.000 m: 149 km. Flugzeug auf einer Startbahn in 30 km Entfernung: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27$ km, also stumm.



Trag d gegen h_2 für deine eigene Antennenhöhe auf. Die Kurve ist zunächst steil und flacht dann ab, und sie erklärt die Form der Abdeckung jedes Empfängers: 400 km und mehr für Verkehr im Reiseflug, einige zehn Kilometer für Flugzeuge im Anflug, nichts am Boden außer am Flughafen nebenan. Sie erklärt, warum die Höhe die wichtigste Eigenschaft eines Empfängers ist und warum ein Hügel, ein Gebäude oder die eigene Tragfläche des Flugzeugs, wenn es sich in die Kurve legt, eine Spur schlagartig abreißen lassen kann.

Die zweite Grenze ist die Energie. Ein Transponder strahlt einige hundert Watt ab, ungefähr gleichmäßig in alle horizontalen Richtungen. In der Entfernung d verteilt sich diese Leistung über eine Kugel mit der Fläche $4\pi d^2$, also nimmt die Leistung, die eine Antenne mit fester wirksamer Fläche auffängt, mit $1/d^2$ ab.

d^2 ab: das Abstandsquadratgesetz, das du aus der Kugeloberfläche herleiten solltest, statt es auswendig zu lernen. Doppelt so weit, ein Viertel der Leistung; zehnmal so weit, ein Hundertstel. Ingenieure geben den Verlust in Dezibel an, wobei 10 dB einem Faktor zehn und 3 dB einem Faktor zwei in der Leistung entsprechen, denn Dezibel verwandeln Multiplikationen über viele Größenordnungen in Additionen. Die Freiraumdämpfung zwischen zwei einfachen Antennen beträgt:

$$\text{Freiraumdämpfung (dB)} = 20 \log_{10}(d \text{ in km}) + 20 \log_{10}(f \text{ in MHz}) + 32,44$$

Bei 400 km und 1090 MHz: $52,0 + 60,7 + 32,4 = 145$ dB. Ein 250-W-Sender entspricht +54 dBm; Empfangsleistung $54 - 145 = -91$ dBm, etwa 8×10^{-13} W.

Bei dieser Zahl lohnt es sich innezuhalten: Ein Empfänger auf einem Dach erkennt ein Signal, das $10^{14,5}$ -mal schwächer ist als das, das der Flugzeug verlassen hat - ein Millionstel eines Millionstels Watt. Ein guter Hobbyempfänger decodiert bis hinunter zu etwa -100 dBm, also bleiben bei 400 km 9 dB Reserve. Anders gesagt: Die energetische Grenze und der geometrische Horizont fallen für ein Verkehrsflugzeug im Reiseflug an dieselbe Stelle, und das ist gewollt: Transponderleistung und Empfängernormen wurden so festgelegt, dass ein Flugzeug bis zu seinem Horizont hörbar ist und nicht viel weiter, damit der Kanal nicht vom Verkehr aus dem Nachbarland überflutet wird.

Zwei Verfeinerungen. Doppler: Ein Flugzeug, das sich mit 250 m/s nähert, verschiebt die Empfangsfrequenz um $f \cdot v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Hz, weniger als ein Millionstel, was ein Empfänger nie bemerkt; vergleiche das mit dem Klang desselben Flugzeugs, bei dem v / c gleich $250 / 343$ ist und die Tonhöhe beim Vorbeiflug um fast eine Oktave fällt. Und die Laufzeit: 400 km bei c sind 1,33 ms, also ist die gesendete Position bei ihrer Ankunft bereits 1,33 ms alt, in denen sich das Flugzeug um 33 cm bewegt hat; vernachlässigbar für eine Karte, entscheidend für die Multilateration, die genau von diesen Mikrosekunden lebt.

STUNDE 5

Antennen und Empfänger: von einer 27-Zentimeter-Welle zum Punkt auf der Karte

Eine Antenne ist ein Leiter, in dem eine vorbeilaufende elektromagnetische Welle einen Wechselstrom induziert, und dasselbe Bauteil sendet, von einem Strom gespeist, eine Welle aus; Empfangs- und Sendeantennen sind dasselbe, nur rückwärts betrieben. Der induzierte Strom ist bei Resonanz am größten, wenn die Länge des Leiters die Stromverteilung entlang des Leiters zur Schwingung der Welle passen lässt - so wie eine Saite der richtigen Länge bei einem bestimmten Ton mitschwingt. Die Grundresonanz eines geraden Leiters liegt bei einer halben Wellenlänge, 13,75 cm bei 1090 MHz, mit dem größten Strom in der Mitte und null an den Enden. Die praxistaugliche ADS-B-Antenne, an Flugzeugen und an den meisten Empfängern, ist ein Viertelwellen-Monopol: ein senkrechtes Element von 6,9 cm auf einer leitenden Massefläche, die es spiegelt, sodass Element und Spiegelbild zusammen den Halbwellendipol bilden. Am Flugzeug ist der Rumpf die Massefläche; eine gekaufte 1090-MHz-Antenne verbirgt dieselbe Geometrie in ihrem Rohr, mehrfach übereinander gestockt. Eine selbst gebaute wird schon durch wenige Millimeter Abweichung verstimmt und empfängt nur einen Bruchteil des Himmels - deshalb verwendet der Empfänger des Projekts eine werkseitig abgestimmte Antenne.

Ein senkrechter Monopol ist zum Horizont hin am empfindlichsten und entlang seiner eigenen Achse überhaupt nicht; seine Empfindlichkeit in drei Dimensionen ist ein Donut, durch dessen Loch die Antenne verläuft. Dein Empfänger hört also Flugzeuge in 300 km Entfernung perfekt und verliert eines, das direkt über ihn hinwegfliegt, für einige Sekunden - und du kannst zusehen, wie das passiert. Eine Kollinearantenne, mehrere übereinandergestapelte Resonanzelemente, drückt den Donut flacher und erhöht die Empfindlichkeit am Horizont auf Kosten des Lochs über ihr: Das ist der Antennengewinn, gemessen in dBi, und er entsteht durch Umverteilen von Empfindlichkeit, niemals durch deren Erzeugung. Und aus Stunde 1 wissen wir: Die Antenne muss senkrecht stehen, weil die Welle vertikal polarisiert ist.

Zwischen der Antenne und einem Punkt auf der Karte liegen vier Stufen. Ein Bandpassfilter lässt 1090 MHz durch und sperrt die weitaus stärkeren Mobilfunksignale einige hundert Megahertz daneben, die sonst alles dahinter übersteuern würden. Ein rauscharmer Verstärker an der Antenne vervielfacht das Signal tausendfach, bevor es ins Kabel geht, das bei 1090 MHz etwa 3 dB, also die Hälfte des Signals, pro zehn Meter verliert; wer erst nach dem Kabel verstärkt, verstärkt auch dessen Rauschen. Ein Software-Defined Radio, ein USB-Gerät für 20 Euro, ursprünglich als Fernsehtuner verkauft, mischt das Signal herunter und tastet es zwei Millionen Mal pro Sekunde zu einem Zahlenstrom ab. Ab hier ist es Programmierung: Freie Software durchsucht die Abtastwerte nach der Präambel, misst, welche Hälfte jedes Mikrosekunden-Slots mehr Energie trägt, setzt 112 Bit zusammen, berechnet den CRC und decodiert, wenn die Prüfung bestanden ist, die Felder. Ein Tracker paart dann gerade und ungerade Positionsrahmen, führt Position, Geschwindigkeit und Kennung anhand der ICAO-Adresse zusammen und hält den Zustand jedes Flugzeugs fest, bis keine Nachrichten mehr ankommen - meist, weil es unter den Horizont gesunken ist.

Zeichne diese Kette mit der Größe auf jeder Stufe: Nanovolt an der Antenne, Mikrovolt nach dem Verstärker, zwei Millionen Abtastwerte pro Sekunde aus dem Funkempfänger, einige hundert Rahmen pro Sekunde aus dem Decoder, ein Datensatz pro Flugzeug aus dem Tracker. Ein Punkt auf einer Karte ist das ferne Ende einer Kette, in der jedes Glied eine Idee aus diesem Kurs ist: Resonanz, Filterung, Verstärkung, Abtastung, Mustererkennung, Decodierung, Fehlerprüfung, Zusammenführung. Das Projekt besteht darin, die Kette zu bauen und den Kurs am Himmel zu überprüfen: Miss deine maximale Reichweite in Abhängigkeit von der Höhe und vergleiche sie mit der Horizontformel; vergleiche die Antenne drinnen, am Fenster und auf dem Dach, senkrecht und waagrecht; zeichne einen Tag Verkehr auf und finde die verkehrsreichste Stunde und die typische Reiseflughöhe; decodiere Rohnachrichten und überprüfe ihren CRC mit deinem eigenen Code. Und dann stell die Fragen, die das System aufwirft, aber nicht beantwortet: Die Nachrichten sind nicht signiert - was hindert also jemanden daran, ein Phantomflugzeug auszusenden? Das Flugzeug hängt von Satelliten ab, die gestört werden können - was sieht der Fluglotse, wenn das passiert? Und die Daten identifizieren Flugzeuge, die wiederum Menschen identifizieren können - wer sollte also wem folgen dürfen?

Aufgaben

Löse jede Aufgabe zuerst auf Papier. Die Kontrolle zeigt die Antwort und den Lösungsweg.

1. 1. Wie groß ist die Wellenlänge des 1090-MHz-Signals, und wie lang ist eine Viertelwellenantenne dafür?

2. 2. Wie viel Mal schneller als Schall ist die Nachricht? Ein Flugzeug in 30 km Entfernung sendet beides gleichzeitig aus; wie weit ist es geflogen, wenn der Schall ankommt?

3. 3. Die Uhr eines Empfängers geht um 2 Mikrosekunden falsch. Welchen Entfernungsfehler verursacht das, und warum braucht ein Satellitenempfänger vier Satelliten statt drei?

4. 4. Wie viele Flugzeuge können 24 Adressbits unterscheiden? Wie lange dauert eine 112-Bit-Nachricht bei 1 Bit pro Mikrosekunde, und wie lange die ganze Aussendung mit Präambel?

5. 5. Welches Downlink-Format und welche Capability hat die Nachricht 8D4840D6..., und wie lautet die ICAO-Adresse?

6. 6. Eine Empfangsantenne ist in 15 m Höhe montiert. Wie weit reicht der Funkhorizont zu einem Flugzeug in 9.000 m und zu einem in 300 m?

7. 7. Warum viertelt die doppelte Entfernung die Empfangsleistung? Wie groß ist die Freiraumdämpfung bei 200 km, und wie verhält sie sich zu den 145 dB bei 400 km?

8. 8. Sag voraus, was mit der Reichweite passiert, wenn die Antenne waagerecht gelegt wird und wenn der Empfänger vom Dach ins Erdgeschoss umzieht.

ALS NÄCHSTES

Bau ihn

Alles in diesen Stunden lässt sich vom Fenster aus überprüfen. Der Praxis-Workshop gibt dir die Einkaufsliste (etwa 100 bis 150 Euro, oder ein Raspberry Pi, den du schon hast), die Wahl der Antenne und wo sie hinkommt, die drei Befehle, die den Dataero-Feeder installieren, und die Messungen, die die Formeln an echten Flugzeugen überprüfen: den Funkhorizont, das Abstandsquadratgesetz, den Tagesrhythmus. Wenn dein Empfänger die Karte beliefert, wird jedes Flugzeug, das er empfängt, für alle eingezeichnet, mit dem Namen deiner Station daran.

Praxis-Workshop öffnen <https://radar.dataero.eu/de/learning/workshop>

Lösungen

1. 1. Wie groß ist die Wellenlänge des 1090-MHz-Signals, und wie lang ist eine Viertelwellenantenne dafür?
 $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275 \text{ m}$. Ein Viertelwellenelement ist 6,9 cm lang. Die feste Lichtgeschwindigkeit zwingt Frequenz und Wellenlänge in ein umgekehrtes Verhältnis.
2. 2. Wie viel Mal schneller als Schall ist die Nachricht? Ein Flugzeug in 30 km Entfernung sendet beides gleichzeitig aus; wie weit ist es geflogen, wenn der Schall ankommt?
 $3,00 \times 10^8 / 343 = \text{etwa } 875.000\text{-mal}$. Die Nachricht kommt nach 100 Mikrosekunden an, der Schall nach 87 s, in denen das Flugzeug mit 250 m/s 22 km fliegt.
3. 3. Die Uhr eines Empfängers geht um 2 Mikrosekunden falsch. Welchen Entfernungsfehler verursacht das, und warum braucht ein Satellitenempfänger vier Satelliten statt drei?
 $2 \times 10^{-6} \text{ s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 600 \text{ m}$. Drei Satelliten legen x, y und z nur fest, wenn die Uhr perfekt ist; die Uhrenabweichung ist eine vierte Unbekannte, also braucht es einen vierten Satelliten.
4. 4. Wie viele Flugzeuge können 24 Adressbits unterscheiden? Wie lange dauert eine 112-Bit-Nachricht bei 1 Bit pro Mikrosekunde, und wie lange die ganze Aussendung mit Präambel?
 $2^{24} = 16.777.216$. Die Daten dauern 112 Mikrosekunden; mit der 8 Mikrosekunden langen Präambel 120 Mikrosekunden.
5. 5. Welches Downlink-Format und welche Capability hat die Nachricht 8D4840D6..., und wie lautet die ICAO-Adresse?
8D = 1000 1101. Die ersten fünf Bits 10001 = 17: DF 17, ADS-B von einem Mode-S-Transponder. Die nächsten drei Bits 101 = 5: CA 5. Die ICAO-Adresse ist 4840D6, den Niederlanden zugeteilt.
6. 6. Eine Empfangsantenne ist in 15 m Höhe montiert. Wie weit reicht der Funkhorizont zu einem Flugzeug in 9.000 m und zu einem in 300 m?
 $d = 4,12 \times (\sqrt{15} + \sqrt{9000}) = 4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407 \text{ km}$. Für 300 m: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87 \text{ km}$.
7. 7. Warum viertelt die doppelte Entfernung die Empfangsleistung? Wie groß ist die Freiraumdämpfung bei 200 km, und wie verhält sie sich zu den 145 dB bei 400 km?
 Die Sendeleistung verteilt sich über eine Kugel mit der Fläche $4 \pi d^2$, die bei doppelter Entfernung viermal so groß ist. Bei 200 km: $20 \log_{10}(200) + 20 \log_{10}(1090) + 32,44 = 46,0 + 60,7 + 32,4 = 139 \text{ dB}$, also 6 dB (ein Faktor vier) weniger als bei 400 km.
8. 8. Sag voraus, was mit der Reichweite passiert, wenn die Antenne waagerecht gelegt wird und wenn der Empfänger vom Dach ins Erdgeschoss umzieht.
Waagerecht: Die Antenne ist gegenüber der vertikalen Welle kreuzpolarisiert; der induzierte Strom hängt von der Feldkomponente entlang des Leiters ab, also hört sie sehr wenig. Erdgeschoss: Der Horizontterm $4,12 \sqrt{h1}$ schrumpft, und Gebäude blockieren die Sichtlinie, sodass die Reichweite stark sinkt, besonders bei tief fliegenden Flugzeugen.