

PHYSIQUE ET INFORMATIQUE - DE 12 À 18 ANS

Décoder le ciel

La ligne d'hexadécimal ci-dessous est un vrai message, envoyé par un vrai avion environ deux fois par seconde. En 112 millièmes de seconde, il annonce qui est l'avion et, dans les messages qui l'accompagnent, où il est, à quelle altitude et à quelle vitesse. Ce cours parcourt tout ce qu'il faut pour le comprendre : la physique de l'onde qui le porte, la mesure du temps qui donne sa position à l'avion, le codage qui le fait tenir en 112 bits, la géométrie qui limite la distance à laquelle on l'entend, et le récepteur que vous pouvez construire pour l'entendre vous-même.

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

SOMMAIRE

Ce qu'est l'ADS-B, en une page

LEÇON 1 L'onde : la radio comme lumière invisible

LEÇON 2 Temps et position : comment l'avion sait où il est

LEÇON 3 Le message : 112 bits, et comment les erreurs sont détectées

LEÇON 4 La portée : la courbure de la Terre et la loi de l'inverse du carré

LEÇON 5 Antennes et récepteurs : d'une onde de 27 centimètres à un point sur une carte

Défis

ET ENSUITE Construisez-le

Ce qu'est l'ADS-B, en une page

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

Un squitter étendu tel qu'un récepteur l'enregistre : 28 chiffres hexadécimaux, 112 bits. À la leçon 3, vous saurez en lire chaque champ.

Le contrôle aérien doit savoir où est chaque avion, en continu, pour les tenir à distance : un avion de ligne en croisière parcourt 250 m chaque seconde, et les règles de séparation exigent 300 m verticalement ou 9 km horizontalement entre avions sous contrôle radar. Pendant soixante-dix ans, le moyen de le savoir a été le radar : une station au sol envoie une impulsion et chronomètre l'écho ou, dans la forme secondaire améliorée, interroge un transpondeur à bord de l'avion qui répond sur 1090 MHz par une identité et une altitude. Le radar a des limites : il lui faut une puissance énorme, il ne voit chaque avion qu'une fois par rotation d'antenne, et il ne peut pas couvrir les océans ni les montagnes.

L'ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (surveillance dépendante automatique en mode diffusion), inverse le problème. Chaque avion moderne embarque un récepteur de navigation par satellite et connaît donc sa propre position à quelques mètres près. L'ADS-B fait simplement annoncer cette position par le transpondeur de l'avion, avec son identité, son altitude et sa vitesse, environ deux fois par seconde, sur 1090 MHz, à personne en particulier. Automatique parce que rien ne le déclenche ; dépendant parce que l'information vient entièrement des instruments de l'avion ; surveillance parce que

son but est de savoir où sont les avions ; diffusion parce qu'il est envoyé en clair à quiconque écoute. Depuis 2020, il est obligatoire pour la plupart des avions dans l'espace aérien européen et américain. Les contrôleurs l'utilisent à côté du radar, les autres avions s'en servent pour se voir, et un récepteur USB à 25 euros sur le toit d'une école entend exactement les mêmes messages.

Pour comprendre le système, il faut comprendre cinq choses, et chacune est une leçon : l'onde électromagnétique qui porte le message ; la mesure du temps qui donne sa position à l'avion, et qui permet à un réseau de trouver un avion qui ne dit pas où il est ; le message numérique et la façon dont ses erreurs sont détectées ; la géométrie et l'énergie qui limitent la distance à laquelle on l'entend ; et l'antenne et le récepteur qui le retransforment en données. Le récit complet se trouve dans le cours de référence ; lisez-en les chapitres 3 et 5 avant la leçon 3 et les chapitres 6 à 8 avant les leçons 4 et 5.

LEÇON 1

L'onde : la radio comme lumière invisible

Le message quitte l'avion sous forme d'onde électromagnétique : des champs électrique et magnétique oscillants qui se propagent dans l'espace sans milieu, à la vitesse de la lumière $c = 3,00 \times 10^8$ m/s. La lumière visible est le même phénomène à une fréquence plus élevée ; vos yeux réagissent à environ 4 à 8×10^{14} Hz, tandis que l'ADS-B est émis à $1,09 \times 10^9$ Hz, un demi-million de fois plus bas. Il n'y a aucune différence de nature entre le message de l'avion et la lumière de cet écran, seulement de fréquence.

Comme l'onde se déplace à vitesse fixe, sa fréquence détermine sa longueur d'onde. En une seconde, l'onde avance de c mètres et accomplit f cycles, donc chaque cycle occupe c / f mètres : $c = f \times \lambda$. Pour l'ADS-B, $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. L'onde qui passe entre un avion et votre antenne a des crêtes espacées de 27,5 cm, entre un signal de téléphone mobile (17 cm) et une station de radio FM (3 m) sur le spectre. Dessinez ce spectre vous-même, sur un axe logarithmique de 10^6 Hz à 10^{18} Hz, et placez-y la radio FM, l'ADS-B, les téléphones mobiles, le Wi-Fi, l'infrarouge, la lumière visible et les rayons X. L'onde de l'avion se trouve parmi les choses que vous avez dans la poche.

$$c = f \times \lambda$$

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

Ce qu'une onde radio n'est pas, c'est du son. Le son est une onde de pression dans un milieu, qui se propage à 343 m/s dans l'air, 1 500 m/s dans l'eau, et pas du tout dans le vide. La radio est de la lumière : elle n'a besoin d'aucun milieu, c'est ainsi qu'elle traverse le vide entre un satellite et l'avion, et elle est plus rapide d'un facteur $3,00 \times 10^8 / 343$, soit environ 875 000. Si un avion à 30 km émet un son et un message au même instant, le message arrive en 100 microsecondes ; le son arrive 87 secondes plus tard, et entre-temps l'avion a parcouru 22 km. Une onde sur une corde partage avec la lumière les propriétés qui comptent, une longueur d'onde, une fréquence et une vitesse fixe, de sorte que secouer plus vite donne des ondes plus courtes et non plus rapides ; elle en diffère en ce qu'elle a besoin de la corde.

Une propriété de l'onde comptera à la leçon 5 : sa polarisation. Le champ électrique oscille dans une direction définie, perpendiculaire à la direction de propagation. Les antennes des avions sont verticales, donc l'onde ADS-B est polarisée verticalement, et une antenne de réception couchée sur le côté n'en

intercepte presque rien, comme une onde sur une corde secouée verticalement est arrêtée par une fente horizontale. Prédisez dès maintenant ce qui arrivera à la portée de votre récepteur si l'antenne est horizontale ; vous le testerez dans le projet.

LEÇON 2

Temps et position : comment l'avion sait où il est

La position contenue dans chaque message ADS-B vient de la navigation par satellite, et la navigation par satellite est une mesure de temps. Une trentaine de satellites par système (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) orbitent à environ 20 200 km, chacun avec une horloge atomique, chacun émettant un signal qui indique sa propre position et l'instant exact de l'émission. Le récepteur de l'avion note l'instant d'arrivée. La différence, multipliée par c , est la distance à ce satellite ; depuis la verticale, le signal met $20\,200 / 300\,000 = 0,0673$ s. Une distance place le récepteur sur une sphère autour de ce satellite ; deux sphères se rencontrent selon un cercle ; trois se rencontrent en deux points, dont l'un est loin de la Terre et se rejette. Trois satellites suffiraient si le récepteur avait une horloge parfaite. Il a un cristal de quartz qui dérive de plusieurs microsecondes, et une microseconde, c'est 300 m de distance. Le récepteur traite donc sa propre erreur d'horloge comme une quatrième inconnue et utilise un quatrième satellite : quatre équations, quatre inconnues (x, y, z et le décalage d'horloge), résolues en continu. Par-dessus le marché, tout récepteur satellite garde l'heure à quelques dizaines de nanosecondes près, ce dont dépend la seconde moitié de cette leçon.

Retenez les ordres de grandeur : la lumière parcourt 0,3 m par nanoseconde et 300 m par microseconde. Une position précise à 3 m signifie une mesure du temps précise à 10 ns. Un satellite dont l'horloge avancerait de 1 microseconde pousserait chaque récepteur qui l'utilise de 300 m le long de la ligne vers lui, et c'est pourquoi les horloges des satellites sont corrigées depuis le sol plusieurs fois par jour.

L'avion porte deux altitudes. La solution satellite donne une hauteur géométrique au-dessus de l'ellipsoïde de référence. Mais l'altitude qu'il diffuse pour le contrôle aérien est barométrique : la pression de l'air à une prise sur le fuselage, convertie en hauteur par l'atmosphère standard internationale, qui suppose 1013,25 hPa et 15 degrés C au niveau de la mer et un gradient de 6,5 degrés par kilomètre. Quand la pression réelle diffère de la pression standard, l'altitude barométrique de tous les avions est faussée de la même quantité, ce qui est précisément ce dont la séparation a besoin : deux avions qui lisent les niveaux de vol 350 et 360 sont à 1 000 ft l'un de l'autre quel que soit le temps. Le message de position porte l'altitude barométrique par pas de 25 pieds ; le message de vitesse porte la différence entre hauteur barométrique et hauteur géométrique. Si vous avez un tableur, inversez $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ et vérifiez qu'à 11 000 m la pression est d'environ 227 hPa, moins d'un quart de celle du niveau de la mer : l'air dans lequel vole un avion de ligne ne vous garderait pas conscient.

Renversez maintenant toute l'idée. Certains avions émettent sur 1090 MHz sans position : de vieux transpondeurs qui répondent au radar avec seulement une identité et une altitude, ou des avions dont la réception satellite est brouillée. Un réseau de récepteurs peut quand même les localiser par multilatération. Supposons que quatre récepteurs aux horloges synchronisées enregistrent chacun l'heure d'arrivée de la même émission. Un message qui a atteint le récepteur A une microseconde avant le récepteur B a été émis d'un point 300 m plus proche de A que de B, et tous ces points forment un hyperboloïde de foyers A et B. Trois paires indépendantes tirées de quatre récepteurs donnent trois hyperboloïdes, qui se coupent à l'avion. C'est le problème des satellites avec le connu et l'inconnu

échangés : là-bas, un récepteur et quatre émetteurs connus ; ici, un émetteur et quatre récepteurs connus. Dans les deux cas, ce qu'on mesure est le temps, et 1 microseconde vaut 300 m. Les récepteurs synchronisent leurs horloges à environ 100 ns grâce aux mêmes satellites que l'avion utilise.

Vous pouvez le faire avec du son. Trois personnes munies de chronomètres à des points relevés sur un terrain de sport ; une quatrième, cachée, frappe une fois dans ses mains ; chacune note le retard. Avec un son à 343 m/s, une différence de 0,1 s vaut 34 m, et un dessin à l'échelle avec des positions d'essai, ou un tracé des hyperboles, trouve celui qui a frappé. Demandez-vous ensuite quelle précision les chronomètres devraient avoir pour faire la même chose avec de la radio sur 200 km, et vous comprendrez pourquoi le réseau a besoin du temps atomique.

LEÇON 3

Le message : 112 bits, et comment les erreurs sont détectées

Le transpondeur envoie l'ADS-B sous forme de squitter étendu Mode S : un préambule de 8 microsecondes, puis 112 bits de données à un bit par microseconde. Le préambule est un motif fixe de quatre impulsions à 0, 1, 3,5 et 4,5 microsecondes, et son rôle est de répondre à une question que vous n'avez peut-être pas pensé à poser : dans un canal plein de bruit et d'autres avions, comment un récepteur sait-il qu'un message a commencé, et quand chaque bit débute ? Le décodeur guette ce motif en permanence, et quand il le voit, il sait les deux. Tout protocole numérique que vous utilisez, du Wi-Fi au code QR, a un équivalent.

Un émetteur peut être allumé ou éteint ; comment envoie-t-il un 1 ou un 0 ? L'ADS-B utilise la modulation par position d'impulsion. Chaque intervalle de bit d'une microseconde est divisé en deux moitiés : une impulsion dans la première moitié et le silence dans la seconde est un 1 ; le silence puis une impulsion est un 0. Il y a toujours exactement une impulsion par bit. Réfléchissez à la raison pour laquelle c'est mieux que « impulsion veut dire 1, pas d'impulsion veut dire 0 ». Le récepteur ne perd jamais sa synchronisation, même à travers une longue suite de zéros, qui dans le procédé naïf serait indiscernable du silence. Et il décide chaque bit en demandant quelle moitié a été la plus forte plutôt que si une impulsion a dépassé un niveau fixe, de sorte qu'un signal faible venu de 400 km se décode aussi sûrement qu'un signal fort venu de la verticale.

Quatre bits en modulation par position d'impulsion : 1, 0, 1, 1



Chaque intervalle dure 1 microseconde. Impulsion dans la première moitié : 1. Impulsion dans la seconde moitié : 0.

Les 112 bits sont disposés comme suit, et vous devriez pouvoir le reproduire de mémoire. Bits 1 à 5 : le format de liaison descendante, 17 pour l'ADS-B émis par un transpondeur. Bits 6 à 8 : un code de capacité. Bits 9 à 32 : l'adresse ICAO de 24 bits, l'identité permanente de l'avion, attribuée à l'immatriculation ; il en existe $2^{24} = 16\,777\,216$, allouées aux États par blocs, celui de la Belgique allant de 448000 à 44FFFF en hexadécimal. Bits 33 à 88 : le champ de message de 56 bits, dont les cinq premiers bits, le code de type, disent ce que contiennent les 51 autres. Les codes de type 1 à 4 portent

l'indicatif sous forme de huit caractères de 6 bits, 64 symboles chacun. Les codes de type 9 à 18 portent une position en vol : 12 bits d'altitude barométrique par pas de 25 pieds, un drapeau pair/impair, et 17 bits chacune de latitude et de longitude codées. Le code de type 19 porte la vitesse sous forme de composantes est-ouest et nord-sud de la vitesse sol, la vitesse verticale, et la différence de hauteur barométrique-géométrique. Bits 89 à 112 : la parité de 24 bits. Vérifiez l'arithmétique : 12 bits d'altitude à 25 ft couvrent 102 400 ft ; 17 bits utilisés naïvement sur 180 degrés de latitude ne résoudraient que 1,4 km. La position est meilleure que cela grâce au codage compact de la position : les 17 bits donnent la position à l'intérieur d'une zone à quelques mètres près, pas de quelle zone il s'agit, et l'avion alterne entre deux grilles de zones, paire et impaire. Un récepteur qui en a entendu une de chaque résout la zone sans ambiguïté, puis suit à partir de messages isolés. Plus de précision avec les mêmes bits, achetée avec du temps.

DF 5 bits format de liaison descendante	CA 3 bits capacité	adresse ICAO 24 bits identité unique de l'avion	ME - la charge utile 56 bits position, altitude, vitesse, indicatif ou statut, selon le code de type contenu dans ses 5 premiers bits	PI 24 bits contrôle d'erreur (CRC)
--	---------------------------------	--	---	---

Disséquez le vrai message du haut de cette page. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 compte 28 chiffres hexadécimaux, 112 bits. Les deux premiers chiffres, 8D, s'écrivent 1000 1101 en binaire ; les cinq premiers bits, 10001, font 17, donc c'est de l'ADS-B émis par un transpondeur, et les trois suivants, 101, donnent la capacité 5. Les six chiffres suivants, 4840D6, sont l'adresse ICAO, que les tables d'allocation situent aux Pays-Bas. La paire de chiffres suivante, 20, commence par 00100, code de type 4, un message d'identification, et le décodage des caractères de 6 bits qui suivent donne l'indicatif KLM1023. Les six derniers chiffres, 576098, sont la parité. Avec un tableur ou quelques lignes de code, vous pouvez faire tout le décodage, et savoir regarder une ligne d'hexadécimal et dire « un avion KLM qui annonce le vol 1023 » est le but de cette leçon.

La parité mérite le plus de réflexion. Au-dessus d'un aéroport fréquenté, les émissions d'avions différents se chevauchent constamment au niveau d'un récepteur, et des impulsions isolées se perdent dans le bruit ; un décodeur assemblera inévitablement, parfois, des bits faux. Les 24 derniers bits sont un contrôle de redondance cyclique : les 88 bits du message sont traités comme un long nombre binaire et divisés, dans une arithmétique où la soustraction est le ou exclusif, par un polynôme générateur fixe de 25 bits ; le reste est le CRC. Le récepteur refait la division sur les bits qu'il a décodés. Tout bit isolé inversé, toute paire de bits, et toute rafale d'erreurs jusqu'à 24 bits de long change le reste, et le message est rejeté. Essayez un CRC de 4 bits sur un message de 8 bits à la main pour voir le mécanisme, puis, si vous programmez, implémentez le vrai CRC-24 et vérifiez que le message d'exemple passe et qu'inverser n'importe quel bit le fait échouer. C'est la détection d'erreurs telle que tout système moderne la pratique, dans un contexte où une erreur manquée pourrait mettre un avion fantôme sur l'écran d'un contrôleur.

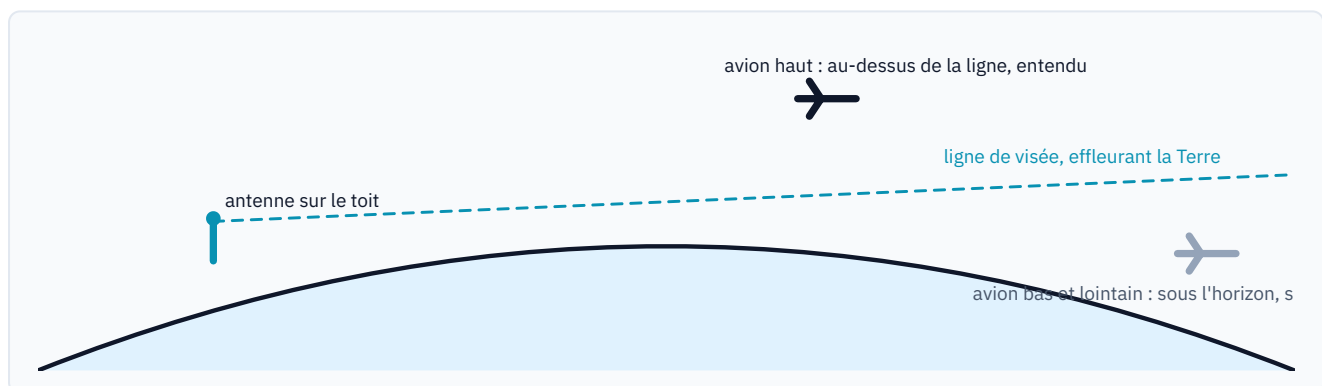
LEÇON 4

La portée : la courbure de la Terre et la loi de l'inverse du carré

De quelle distance un récepteur peut-il entendre un avion ? Deux limites différentes s'appliquent, et il vaut la peine de les garder séparées. La première est géométrique. À 1090 MHz, la radio ne contourne pas la Terre ; elle va en ligne droite, donc un récepteur n'entend que les avions au-dessus de son horizon, ceux depuis lesquels une ligne droite vers l'antenne passe au-dessus du sol. Établissez la distance de l'horizon. Une antenne à la hauteur h au-dessus d'une sphère de rayon R voit un horizon là où sa ligne de visée est tangente à la sphère ; la tangente et les deux rayons forment un angle droit au point de tangence, donc $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, ce qui donne $d^2 = 2Rh + h^2$, et comme h est négligeable devant R , $d = \sqrt{2Rh}$. Avec $R = 6\,371$ km et h en mètres, d (km) = $3,57 \sqrt{h}$. L'atmosphère incurve légèrement la radio vers le bas parce que son indice de réfraction diminue avec la hauteur ; la correction standard traite la Terre comme si elle avait les quatre tiers de son rayon réel, remplaçant 3,57 par 4,12. La ligne de visée complète d'une antenne à h_1 vers un avion à h_2 est la somme des deux distances d'horizon :

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad \text{avec } h_1, h_2 \text{ en mètres}$$

Antenne sur un toit de 20 m, avion à 11 000 m : $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451$ km. Même antenne, avion à 1 000 m : 149 km. Avion sur une piste à 30 m : $4,12 \times (4,47 + 2) = 27$ km, donc silencieux.



Tracez d en fonction de h_2 pour la hauteur de votre propre antenne. La courbe est raide au début puis s'aplatit, et elle explique la forme de la couverture de tout récepteur : 400 km et plus pour le trafic en croisière, quelques dizaines de kilomètres pour les avions en approche, rien au sol sauf à l'aéroport voisin. Elle explique pourquoi la hauteur est la propriété la plus importante d'un récepteur, et pourquoi une colline, un bâtiment ou l'aile de l'avion lui-même lorsqu'il s'incline en s'éloignant peuvent couper une trace instantanément.

La seconde limite est l'énergie. Un transpondeur rayonne quelques centaines de watts, à peu près uniformément dans toutes les directions horizontales. À la distance d , cette puissance s'est répartie sur une sphère d'aire $4\pi d^2$, de sorte que la puissance interceptée par une antenne de surface effective fixe décroît en $1/d^2$: la loi de l'inverse du carré, que vous devriez établir à partir de l'aire de la sphère plutôt que mémoriser. Deux fois plus loin, un quart de la puissance ; dix fois, un centième. Les ingénieurs expriment la perte en décibels, où 10 dB est un facteur dix en puissance et 3 dB un facteur deux, parce que les décibels transforment une multiplication sur de nombreux ordres de grandeur en une addition. L'affaiblissement de propagation en espace libre entre deux antennes simples est :

$$\text{affaiblissement (dB)} = 20 \log_{10}(d \text{ en km}) + 20 \log_{10}(f \text{ en MHz}) + 32.44$$

À 400 km et 1090 MHz : $52,0 + 60,7 + 32,4 = 145 \text{ dB}$. Un émetteur de 250 W fait +54 dBm ; puissance reçue $54 - 145 = -91 \text{ dBm}$, soit environ $8 \times 10^{-13} \text{ W}$.

Ce nombre mérite qu'on s'y arrête : un récepteur sur un toit détecte un signal $10^{14,5}$ fois plus faible que celui qui a quitté l'avion, un millionième de millionième de watt. Un bon récepteur amateur décode jusqu'à environ -100 dBm, il reste donc 9 dB de marge à 400 km. Autrement dit, la limite énergétique et l'horizon géométrique d'un avion de ligne en croisière tombent au même endroit, et c'est voulu : la puissance des transpondeurs et les normes des récepteurs ont été spécifiées pour qu'un avion soit audible jusqu'à son horizon et guère plus loin, ce qui empêche le canal d'être inondé par le trafic du pays voisin.

Deux raffinements. Doppler : un avion qui s'approche à 250 m/s décale la fréquence reçue de $f v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908 \text{ Hz}$, moins d'une partie par million, ce qu'un récepteur ne remarque jamais ; comparez avec le son du même avion, où v / c vaut $250 / 343$ et où la hauteur du son baisse de presque une octave à son passage. Et le temps de vol : 400 km à c font 1,33 ms, si bien que la position diffusée a déjà 1,33 ms d'âge à l'arrivée, pendant lesquelles l'avion a avancé de 33 cm ; négligeable pour une carte, décisif pour la multilatération, qui vit précisément de ces microsecondes.

LEÇON 5

Antennes et récepteurs : d'une onde de 27 centimètres à un point sur une carte

Une antenne est un conducteur dans lequel une onde électromagnétique qui passe induit un courant alternatif, et le même dispositif, parcouru par un courant, lance une onde ; les antennes de réception et d'émission sont la même chose utilisée à l'envers. Le courant induit est maximal à la résonance, lorsque la longueur du conducteur permet à la répartition du courant le long de lui d'épouser l'oscillation de l'onde, comme une corde de la bonne longueur résonne avec une note particulière. La résonance fondamentale d'un conducteur rectiligne se situe à une demi-longueur d'onde, 13,75 cm à 1090 MHz, avec le courant maximal au centre et nul aux extrémités. L'antenne ADS-B pratique, sur les avions et sur la plupart des récepteurs, est un monopôle quart d'onde : un élément vertical de 6,9 cm sur un plan de masse conducteur, qui le reflète de sorte que l'élément et son image forment ensemble le dipôle demi-onde. Sur l'avion, le fuselage est le plan de masse ; une antenne 1090 MHz achetée cache la même géométrie dans son tube, empilée plusieurs fois. Une antenne faite maison est désaccordée par quelques millimètres d'erreur et n'entend qu'une fraction du ciel : c'est pourquoi le récepteur du projet utilise une antenne accordée en usine.

Un monopôle vertical est le plus sensible vers l'horizon et pas du tout le long de son propre axe ; sa sensibilité en trois dimensions est un tore en forme de donut, l'antenne passant par le trou. Votre récepteur entendra donc parfaitement des avions à 300 km et en perdra un qui passe exactement à la verticale pendant quelques secondes, et vous pourrez le voir se produire. Une antenne colinéaire, plusieurs éléments résonants empilés, aplatit le donut et augmente la sensibilité à l'horizon au prix du trou au zénith : c'est le gain d'antenne, mesuré en dBi, et il vient d'une redistribution de la sensibilité, jamais d'une création. Et d'après la leçon 1, l'antenne doit être verticale, parce que l'onde est polarisée verticalement.

Entre l'antenne et un point sur la carte, il y a quatre étages. Un filtre passe-bande laisse passer 1090 MHz et rejette les signaux de téléphonie mobile, bien plus forts, situés à quelques centaines de mégahertz de là, qui sinon satureraient tout ce qui suit. Un amplificateur à faible bruit à l'antenne multiplie le signal par mille avant le câble, qui à 1090 MHz perd environ 3 dB, la moitié du signal, tous les dix mètres ; amplifiez après le câble et vous amplifiez aussi le bruit du câble. Une radio logicielle, un périphérique USB à 20 euros vendu à l'origine comme tuner de télévision, ramène le signal en bande de base et l'échantillonne deux millions de fois par seconde en un flux de nombres. À partir de là, c'est de la programmation : un logiciel libre balaie les échantillons à la recherche du préambule, mesure quelle moitié de chaque intervalle d'une microseconde porte le plus d'énergie, assemble 112 bits, calcule le CRC et, s'il est bon, décode les champs. Un module de suivi apparie ensuite les trames de position paires et impaires, fusionne position, vitesse et identité par adresse ICAO, et conserve l'état de chaque avion jusqu'à ce que les messages cessent d'arriver, généralement parce qu'il est passé sous l'horizon.

Dessinez cette chaîne, avec la grandeur à chaque étage : des nanovolts à l'antenne, des microvolts après l'amplificateur, deux millions d'échantillons par seconde en sortie de la radio, quelques centaines de trames par seconde en sortie du décodeur, un enregistrement par avion en sortie du module de suivi. Un point sur une carte est le bout d'une chaîne dont chaque maillon est une idée de ce cours : résonance, filtrage, amplification, échantillonnage, reconnaissance de motif, décodage, contrôle d'erreur, agrégation. Le projet consiste à construire la chaîne et à confronter le cours au ciel : mesurez votre portée maximale en fonction de l'altitude et comparez-la à la formule de l'horizon ; comparez l'antenne à l'intérieur, à une fenêtre et sur le toit, verticale et horizontale ; enregistrez une journée de trafic et trouvez l'heure la plus chargée et l'altitude de croisière typique ; décodez des messages bruts et vérifiez leur CRC dans votre propre code. Et posez ensuite les questions que le système soulève sans y répondre : les messages ne sont pas signés, alors qu'est-ce qui empêche quelqu'un de diffuser un avion fantôme ; l'avion dépend de satellites qui peuvent être brouillés, alors que voit le contrôleur lorsqu'ils le sont ; et les données identifient les avions, qui peuvent identifier des personnes, alors qui devrait pouvoir suivre qui.

Défis

Résolvez chacun d'abord sur papier. La vérification montre la réponse et le raisonnement.

- 1. 1. Quelle est la longueur d'onde du signal à 1090 MHz, et quelle est la longueur d'une antenne quart d'onde pour lui ?**
- 2. 2. Combien de fois le message est-il plus rapide que le son ? Un avion à 30 km émet les deux en même temps ; quelle distance a-t-il parcourue quand le son arrive ?**
- 3. 3. L'horloge d'un récepteur est décalée de 2 microsecondes. Quelle erreur de distance cela cause-t-il, et pourquoi un récepteur satellite a-t-il besoin de quatre satellites plutôt que trois ?**
- 4. 4. Combien d'avions 24 bits d'adresse peuvent-ils identifier ? Combien de temps dure un message de 112 bits à 1 bit par microseconde, et l'émission entière avec son préambule ?**

5. 5. Dans le message 8D4840D6..., quels sont le format de liaison descendante et la capacité, et quelle est l'adresse ICAO ?

6. 6. Une antenne de réception est à 15 m de haut. Quel est l'horizon radio vers un avion à 9 000 m, et vers un avion à 300 m ?

7. 7. Pourquoi doubler la distance divise-t-il la puissance reçue par quatre ? Quel est l'affaiblissement à 200 km, et comment se compare-t-il aux 145 dB à 400 km ?

8. 8. Prédisez ce qui arrive à la portée si l'antenne est couchée à l'horizontale, et si le récepteur est déplacé du toit au rez-de-chaussée.

ET ENSUITE

Construisez-le

Tout ce que contiennent ces leçons peut se vérifier depuis une fenêtre. L'atelier pratique vous donne la liste d'achats (environ 100 à 150 euros, ou un Raspberry Pi que vous avez déjà), l'antenne à choisir et où la mettre, les trois commandes qui installent le feeder Dataero, et les mesures qui confrontent les formules à de vrais avions : l'horizon radio, la loi de l'inverse du carré, le rythme quotidien. Quand votre récepteur alimente la carte, chaque avion qu'il entend est dessiné pour tout le monde, avec le nom de votre station dessus.

Ouvrir l'atelier pratique <https://radar.dataero.eu/fr/learning/workshop>

Réponses

1. 1. Quelle est la longueur d'onde du signal à 1090 MHz, et quelle est la longueur d'une antenne quart d'onde pour lui ?
 $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275 \text{ m}$. Un élément quart d'onde mesure 6,9 cm. La vitesse fixe de la lumière impose que fréquence et longueur d'onde soient en relation inverse.
2. 2. Combien de fois le message est-il plus rapide que le son ? Un avion à 30 km émet les deux en même temps ; quelle distance a-t-il parcourue quand le son arrive ?
 $3,00 \times 10^8 / 343 = \text{environ } 875\,000 \text{ fois}$. Le message arrive en 100 microsecondes, le son en 87 s, pendant lesquelles l'avion à 250 m/s parcourt 22 km.
3. 3. L'horloge d'un récepteur est décalée de 2 microsecondes. Quelle erreur de distance cela cause-t-il, et pourquoi un récepteur satellite a-t-il besoin de quatre satellites plutôt que trois ?
 $2 \times 10^{-6} \text{ s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 600 \text{ m}$. Trois satellites fixent x, y et z seulement si l'horloge est parfaite ; le décalage d'horloge est une quatrième inconnue, il faut donc un quatrième satellite.
4. 4. Combien d'avions 24 bits d'adresse peuvent-ils identifier ? Combien de temps dure un message de 112 bits à 1 bit par microseconde, et l'émission entière avec son préambule ?
 $2^{24} = 16\,777\,216$. Les données durent 112 microsecondes ; avec le préambule de 8 microsecondes, 120 microsecondes.
5. 5. Dans le message 8D4840D6..., quels sont le format de liaison descendante et la capacité, et quelle est l'adresse ICAO ?
8D = 1000 1101. Les cinq premiers bits 10001 = 17 : DF 17, ADS-B émis par un transpondeur Mode S. Les trois bits suivants 101 = 5 : CA 5. L'adresse ICAO est 4840D6, allouée aux Pays-Bas.
6. 6. Une antenne de réception est à 15 m de haut. Quel est l'horizon radio vers un avion à 9 000 m, et vers un avion à 300 m ?
 $d = 4,12 \times (\sqrt{15} + \sqrt{9000}) = 4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407 \text{ km}$. Pour 300 m : $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87 \text{ km}$.
7. 7. Pourquoi doubler la distance divise-t-il la puissance reçue par quatre ? Quel est l'affaiblissement à 200 km, et comment se compare-t-il aux 145 dB à 400 km ?
La puissance émise se répartit sur une sphère d'aire $4 \pi d^2$, qui est quatre fois plus grande à deux fois la distance. À 200 km : $20 \log_{10}(200) + 20 \log_{10}(1090) + 32,44 = 46,0 + 60,7 + 32,4 = 139 \text{ dB}$, soit 6 dB (un facteur quatre) de moins qu'à 400 km.
8. 8. Prédisez ce qui arrive à la portée si l'antenne est couchée à l'horizontale, et si le récepteur est déplacé du toit au rez-de-chaussée.
Horizontale : l'antenne est en polarisation croisée par rapport à l'onde verticale ; le courant induit dépend de la composante du champ le long du conducteur, donc elle n'entend que très peu. Rez-de-chaussée : le terme d'horizon $4,12 \sqrt{h_1}$ se réduit et les bâtiments bloquent la ligne de visée, donc la portée chute fortement, surtout pour les avions bas.