

FÍSICA E INFORMÁTICA - DE 12 A 18 AÑOS

Descifrar el cielo

La línea en hexadecimal de abajo es un mensaje real, enviado por un avión real unas dos veces por segundo. En 112 millonésimas de segundo anuncia quién es el avión y, en los mensajes que lo acompañan, dónde está, a qué altura y a qué velocidad. Este curso recorre todo lo necesario para entenderlo: la física de la onda en la que viaja, la medida del tiempo que da al avión su posición, la codificación que lo comprime en 112 bits, la geometría que limita hasta dónde puede oírse, y el receptor que puedes construir para oírlo tú mismo.

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

CONTENIDO

Qué es el ADS-B, en una página

LECCIÓN 1 La onda: la radio como luz invisible

LECCIÓN 2 Tiempo y posición: cómo sabe el avión dónde está

LECCIÓN 3 El mensaje: 112 bits, y cómo se detectan los errores

LECCIÓN 4 Alcance: la curva de la Tierra y la ley del inverso del cuadrado

LECCIÓN 5 Antenas y receptores: de una onda de 27 centímetros a un punto en un mapa

Retos

A CONTINUACIÓN Constrúyelo

Qué es el ADS-B, en una página

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

Un squitter extendido tal como lo registra un receptor: 28 dígitos hexadecimales, 112 bits. En la lección 3 sabrás leer cada uno de sus campos.

El control del tráfico aéreo tiene que saber dónde está cada avión, de forma continua, para mantenerlos separados: un avión de línea en crucero recorre 250 m cada segundo, y las reglas de separación exigen 300 m en vertical o 9 km en horizontal entre aviones bajo control radar. Durante setenta años la manera de saberlo fue el radar: una estación de tierra envía un pulso y cronometra el eco o, en la forma secundaria mejorada, interroga a un transpondedor del avión que responde en 1090 MHz con una identidad y una altitud. El radar tiene límites: necesita una potencia enorme, ve cada avión solo una vez por vuelta de antena, y no puede cubrir océanos ni montañas.

El ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (vigilancia dependiente automática por radiodifusión), invierte el problema. Todo avión moderno lleva un receptor de navegación por satélite y, por tanto, conoce su propia posición con un margen de pocos metros. El ADS-B simplemente hace que el transpondedor del avión anuncie esa posición, junto con su identidad, altitud y velocidad, unas dos veces por segundo, en 1090 MHz, a nadie en particular. Automático porque nada lo desencadena; dependiente porque la información procede enteramente de los instrumentos del propio avión; vigilancia porque su propósito es saber dónde están los aviones; radiodifusión porque se envía sin cifrar a cualquiera que

escuche. Desde 2020 es obligatorio para la mayoría de las aeronaves en el espacio aéreo europeo y estadounidense. Los controladores lo usan junto al radar, los demás aviones lo usan para verse entre sí, y un receptor USB de 25 euros en el tejado de una escuela oye exactamente los mismos mensajes.

Para entender el sistema tienes que entender cinco cosas, y cada una es una lección: la onda electromagnética que transporta el mensaje; la medida del tiempo que da al avión su posición, y que permite a una red encontrar un avión que no dice dónde está; el mensaje digital y cómo se detectan sus errores; la geometría y la energía que limitan hasta dónde puede oírse; y la antena y el receptor que lo convierten de nuevo en datos. La narración completa está en el curso de referencia; lee sus capítulos 3 y 5 antes de la lección 3 y los capítulos 6 a 8 antes de las lecciones 4 y 5.

LECCIÓN 1

La onda: la radio como luz invisible

El mensaje sale del avión como una onda electromagnética: campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan por el espacio sin ningún medio, a la velocidad de la luz $c = 3,00 \times 10^8$ m/s. La luz visible es el mismo fenómeno a una frecuencia más alta; tus ojos responden a unos 4 a 8×10^{14} Hz, mientras que el ADS-B se transmite a $1,09 \times 10^9$ Hz, medio millón de veces menos. No hay ninguna diferencia de naturaleza entre el mensaje del avión y la luz de esta pantalla, solo de frecuencia.

Como la onda viaja a una velocidad fija, su frecuencia determina su longitud de onda. En un segundo la onda avanza c metros y completa f ciclos, así que cada ciclo ocupa c / f metros: $c = f \times \lambda$. Para el ADS-B, $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. La onda que pasa entre un avión y tu antena tiene crestas separadas 27,5 cm, entre una señal de teléfono móvil (17 cm) y una emisora de radio FM (3 m) en el espectro. Dibuja tú mismo ese espectro, en un eje logarítmico de 10^6 Hz a 10^{18} Hz, y coloca en él la radio FM, el ADS-B, los teléfonos móviles, el Wi-Fi, el infrarrojo, la luz visible y los rayos X. La onda del avión está entre las cosas que llevas en el bolsillo.

$$c = f \times \lambda$$

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

Lo que una onda de radio no es, es sonido. El sonido es una onda de presión en un medio, que viaja a 343 m/s en el aire, a 1 500 m/s en el agua, y nada en absoluto en el vacío. La radio es luz: no necesita medio, y así es como cruza el vacío desde un satélite hasta el avión, y es más rápida en un factor $3,00 \times 10^8 / 343$, unas 875 000 veces. Si un avión a 30 km emite un sonido y un mensaje en el mismo instante, el mensaje llega en 100 microsegundos; el sonido llega 87 segundos después, y para entonces el avión ha volado 22 km. Una onda en una cuerda comparte con la luz las propiedades que importan, una longitud de onda, una frecuencia y una velocidad fija, de modo que agitar más rápido significa ondas más cortas y no más rápidas; se diferencia en que necesita la cuerda.

Una propiedad de la onda importará en la lección 5: su polarización. El campo eléctrico oscila en una dirección definida, perpendicular a la dirección de avance. Las antenas de los aviones son verticales, así que la onda ADS-B está polarizada verticalmente, y una antena receptora tumbada de lado intercepta casi nada de ella, igual que una onda en una cuerda agitada verticalmente se detiene en una ranura horizontal. Predice ahora qué le pasará al alcance de tu receptor si la antena está horizontal; lo comprobarás en el proyecto.

LECCIÓN 2

Tiempo y posición: cómo sabe el avión dónde está

La posición de cada mensaje ADS-B procede de la navegación por satélite, y la navegación por satélite es una medición de tiempo. Unos treinta satélites por sistema (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) orbitan a unos 20 200 km, cada uno con un reloj atómico, cada uno transmitiendo una señal que indica su propia posición y el instante exacto de la transmisión. El receptor del avión anota el instante de llegada. La diferencia, multiplicada por c , es la distancia a ese satélite; desde justo en la vertical, la señal tarda $20\,200 / 300\,000 = 0,0673$ s. Una distancia sitúa al receptor en una esfera alrededor de ese satélite; dos esferas se cortan en una circunferencia; tres se cortan en dos puntos, uno de ellos lejos de la Tierra y descartado. Tres satélites bastarían si el receptor tuviera un reloj perfecto. Tiene un cristal de cuarzo que deriva microsegundos, y un microsegundo son 300 m de distancia. Así que el receptor trata el error de su propio reloj como una cuarta incógnita y usa un cuarto satélite: cuatro ecuaciones, cuatro incógnitas (x , y , z y el desfase del reloj), resueltas continuamente. Como subproducto, todo receptor de satélites mantiene la hora con una precisión de decenas de nanosegundos, de lo que depende la segunda mitad de esta lección.

Quédate con las magnitudes: la luz recorre 0,3 m por nanosegundo y 300 m por microsegundo. Una posición con 3 m de precisión significa medir el tiempo con 10 ns de precisión. Un satélite cuyo reloj adelantara 1 microsegundo desplazaría a todos los receptores que lo usaran 300 m a lo largo de la línea hacia él, y por eso los relojes de los satélites se corrigen desde tierra varias veces al día.

El avión lleva dos altitudes. La solución por satélite da una altura geométrica sobre el elipsoide de referencia. Pero la altitud que emite a efectos de tráfico aéreo es barométrica: la presión del aire en una toma del fuselaje, convertida en altura mediante la Atmósfera Estándar Internacional, que supone 1013,25 hPa y 15 grados C al nivel del mar y un gradiente de 6,5 grados por kilómetro. Cuando la presión real difiere de la estándar, la altitud barométrica de todos los aviones está equivocada en la misma cantidad, que es precisamente lo que la separación necesita: dos aviones que leen los niveles de vuelo 350 y 360 están a 1 000 pies de distancia haga el tiempo que haga. El mensaje de posición lleva la altitud barométrica en pasos de 25 pies; el mensaje de velocidad lleva la diferencia entre la altura barométrica y la geométrica. Si tienes una hoja de cálculo, invierte $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ y comprueba que a 11 000 m la presión es de unos 227 hPa, menos de un cuarto de la del nivel del mar: el aire por el que vuela un avión de línea no te mantendría consciente.

Ahora invierte la idea entera. Algunos aviones transmiten en 1090 MHz sin posición: transpondedores antiguos que responden al radar solo con identidad y altitud, o aviones cuya recepción de satélites sufre interferencias. Una red de receptores puede localizarlos de todos modos por multilateración. Supón que cuatro receptores con relojes sincronizados registran cada uno el instante de llegada de la misma transmisión. Un mensaje que llegó al receptor A un microsegundo antes que al receptor B fue enviado desde un punto 300 m más cercano a A que a B, y todos esos puntos forman un hiperboloide con A y B como focos. Tres pares independientes de cuatro receptores dan tres hiperboloides, que se cortan en el avión. Es el problema del satélite con lo conocido y lo desconocido intercambiados: allí, un receptor y cuatro transmisores conocidos; aquí, un transmisor y cuatro receptores conocidos. En ambos, lo que se mide es el tiempo, y 1 microsegundo son 300 m. Los receptores sincronizan sus relojes hasta unos 100 ns con los mismos satélites que usa el avión.

Puedes hacerlo con sonido. Tres personas con cronómetros en puntos medidos de un campo de deportes; una cuarta, escondida, da una palmada; cada una anota el retraso. Con el sonido a 343 m/s, una diferencia de 0,1 s son 34 m, y un dibujo a escala con posiciones de prueba, o un esbozo de las hipérbolas, encuentra a quien dio la palmada. Después pregúntate qué precisión necesitarían los cronómetros para hacer lo mismo con radio a 200 km, y entenderás por qué la red necesita tiempo atómico.

LECCIÓN 3

El mensaje: 112 bits, y cómo se detectan los errores

El transpondedor envía el ADS-B como un squitter extendido de Mode S: un preámbulo de 8 microsegundos, y después 112 bits de datos a un bit por microsegundo. El preámbulo es un patrón fijo de cuatro pulsos a 0, 1, 3,5 y 4,5 microsegundos, y su función es responder a una pregunta que quizá no se te había ocurrido: en un canal lleno de ruido y de otros aviones, ¿cómo sabe un receptor que ha empezado un mensaje, y cuándo empieza cada bit? El decodificador vigila continuamente ese patrón, y cuando lo ve, sabe las dos cosas. Todo protocolo digital que usas, del Wi-Fi a un código QR, tiene un equivalente.

Un transmisor puede estar encendido o apagado; ¿cómo envía un 1 o un 0? El ADS-B usa la modulación por posición de pulsos. Cada intervalo de bit, de un microsegundo, se divide en mitades: un pulso en la primera mitad y silencio en la segunda es un 1; silencio y después un pulso es un 0. Siempre hay exactamente un pulso por bit. Piensa por qué eso es mejor que "pulso significa 1, sin pulso significa 0". El receptor nunca pierde la sincronización, ni siquiera en una larga racha de ceros, que en el esquema ingenuo sería indistinguible del silencio. Y decide cada bit preguntando qué mitad sonó más fuerte, y no si un pulso superó algún nivel fijo, de modo que una señal débil desde 400 km se decodifica con la misma fiabilidad que una fuerte desde la vertical.

Cuatro bits en modulación por posición de pulsos: 1, 0, 1, 1



Cada intervalo dura 1 microsegundo. Pulso en la primera mitad: 1. Pulso en la segunda mitad: 0.

Los 112 bits se disponen como sigue, y deberías poder reproducirlo de memoria. Bits 1 a 5: el formato de enlace descendente, 17 para ADS-B desde un transpondedor. Bits 6 a 8: un código de capacidad. Bits 9 a 32: la dirección ICAO de 24 bits, la identidad permanente del avión, asignada al matricularlo; existen $2^{24} = 16\,777\,216$, repartidas por bloques entre los Estados, siendo el de Bélgica de 448000 a 44FFFF en hexadecimal. Bits 33 a 88: el campo de mensaje de 56 bits, cuyos primeros cinco bits, el código de tipo, indican qué contienen los otros 51. Los códigos de tipo 1 a 4 llevan el indicativo como ocho caracteres de 6 bits, 64 símbolos cada uno. Los códigos de tipo 9 a 18 llevan una posición en vuelo: 12 bits de altitud barométrica en pasos de 25 pies, un indicador par/impar, y 17 bits de latitud y 17 de longitud codificadas. El código de tipo 19 lleva la velocidad como componentes este-oeste y norte-sur de la velocidad respecto al suelo, la velocidad vertical y la diferencia entre la altura barométrica y la geométrica. Bits 89 a 112: la paridad de 24 bits. Comprueba la aritmética: 12 bits de altitud a 25 pies

cubren 102 400 pies; 17 bits usados ingenuamente sobre 180 grados de latitud solo resolverían 1,4 km. La posición es mejor que eso gracias a la notificación compacta de posición: los 17 bits dan la posición dentro de una zona con precisión de unos metros, no cuál es la zona, y el avión alterna entre dos rejillas de zonas, par e impar. Un receptor que ha oído una de cada resuelve la zona sin ambigüedad y después sigue la traza a partir de mensajes sueltos. Más precisión con los mismos bits, comprada con tiempo.

DF	CA	dirección ICAO	ME - la carga útil	PI
5 bits	3 bits	24 bits	56 bits	24 bits
formato de enlace descendente	capacidad	identidad única del avión	posición, altitud, velocidad, indicativo o estado, según el código de tipo de sus primeros 5 bits	comprobación de errores (CRC)

Diseciona el mensaje real del principio de esta página. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 son 28 dígitos hexadecimales, 112 bits. Los dos primeros dígitos, 8D, son 1000 1101 en binario; los primeros cinco bits, 10001, son 17, así que esto es ADS-B desde un transpondedor, y los tres siguientes, 101, dan capacidad 5. Los seis dígitos siguientes, 4840D6, son la dirección ICAO, que las tablas de asignación sitúan en los Países Bajos. El siguiente par de dígitos, 20, empieza por 00100, código de tipo 4, un mensaje de identificación, y decodificar los caracteres de 6 bits que siguen da el indicativo KLM1023. Los seis dígitos finales, 576098, son la paridad. Con una hoja de cálculo o unas pocas líneas de código puedes hacer la decodificación completa, y ser capaz de mirar una línea de hexadecimal y decir "un avión de KLM anunciando el vuelo 1023" es el objetivo de esta lección.

La paridad es lo que más merece reflexión. Sobre un aeropuerto concurrido, las transmisiones de distintos aviones se solapan constantemente en un receptor, y pulsos sueltos se pierden por el ruido; un decodificador ensamblará inevitablemente bits erróneos de vez en cuando. Los últimos 24 bits son una comprobación de redundancia cíclica: los 88 bits del mensaje se tratan como un único número binario largo y se dividen, en una aritmética en la que la resta es la o exclusiva (XOR), entre un polinomio generador fijo de 25 bits; el resto es el CRC. El receptor repite la división sobre los bits que decodificó. Cualquier bit invertido, cualesquiera dos, y cualquier ráfaga de errores de hasta 24 bits cambia el resto, y el mensaje se rechaza. Prueba a mano un CRC de 4 bits sobre un mensaje de 8 bits para ver el mecanismo; después, si programas, implementa el CRC-24 real y verifica que el mensaje de ejemplo lo supera y que invertir cualquier bit lo hace fallar. Esto es la detección de errores tal como la hace todo sistema moderno, en un contexto en el que un error no detectado podría poner un avión fantasma en la pantalla de un controlador.

LECCIÓN 4

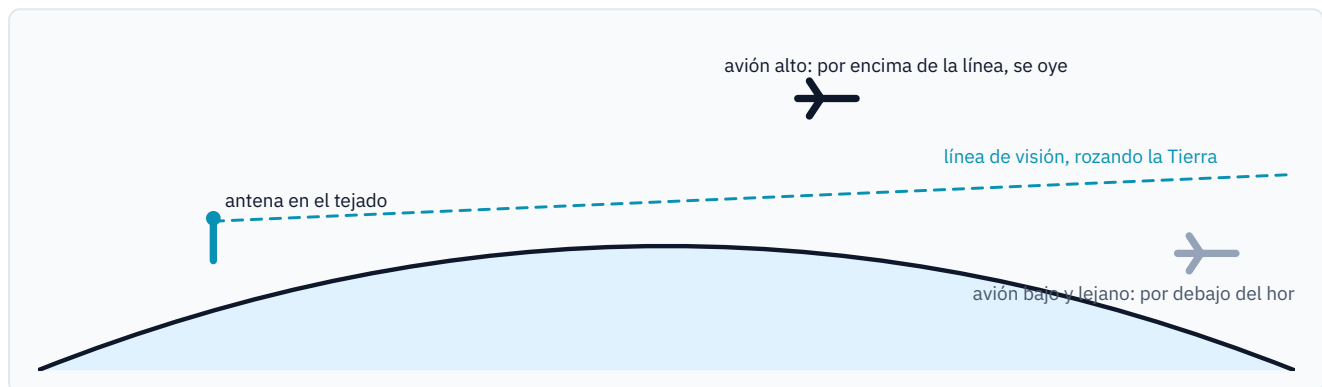
Alcance: la curva de la Tierra y la ley del inverso del cuadrado

¿A qué distancia puede un receptor oír un avión? Se aplican dos límites distintos, y conviene mantenerlos separados. El primero es geométrico. A 1090 MHz la radio no se curva alrededor de la Tierra; viaja en línea recta, así que un receptor solo oye aviones por encima de su horizonte, aquellos desde los que una línea recta hasta la antena libra el suelo. Deduce la distancia al horizonte. Una antena a altura h sobre una esfera de radio R ve un horizonte donde su línea de visión es tangente a la esfera; la tangente y los dos radios forman un ángulo recto en el punto de tangencia, así que $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, lo que da $d^2 = 2Rh + h^2$, y como h es despreciable frente a R , $d = \sqrt{2Rh}$. Con $R = 6\,371$ km y h en metros, d (km) = $3,57 \sqrt{h}$. La atmósfera curva la radio ligeramente hacia abajo porque su índice de refracción

disminuye con la altura; la corrección estándar trata la Tierra como si tuviera cuatro tercios de su radio real, sustituyendo 3,57 por 4,12. La línea de visión completa desde una antena a h_1 hasta un avión a h_2 es la suma de las dos distancias al horizonte:

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

Antena en un tejado de 20 m, avión a 11 000 m: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451 \text{ km}$. Misma antena, avión a 1 000 m: 149 km. Avión en una pista a 30 km: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27 \text{ km}$, así que en silencio.



Representa d frente a h_2 para la altura de tu propia antena. La curva es empinada al principio y luego se aplanan, y explica la forma de la cobertura de cualquier receptor: 400 km y más para el tráfico en crucero, unas pocas decenas de kilómetros para los aviones en aproximación, nada en tierra salvo en el aeropuerto de al lado. Explica por qué la altura es la propiedad más importante de un receptor, y por qué una colina, un edificio o el ala del propio avión cuando se inclina alejándose pueden cortar una traza al instante.

El segundo límite es la energía. Un transpondedor radia unos pocos cientos de vatios, de forma aproximadamente uniforme en todas las direcciones horizontales. A una distancia d esa potencia se ha repartido sobre una esfera de área $4 \pi d^2$, así que la potencia interceptada por una antena de área efectiva fija disminuye como $1 / d^2$: la ley del inverso del cuadrado, que deberías deducir del área de la esfera en lugar de memorizar. Al doble de distancia, un cuarto de la potencia; a diez veces, una centésima. Los ingenieros expresan la pérdida en decibelios, donde 10 dB es un factor diez en potencia y 3 dB un factor dos, porque los decibelios convierten una multiplicación a lo largo de muchos órdenes de magnitud en una suma. La pérdida de trayecto en espacio libre entre dos antenas sencillas es:

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

A 400 km y 1090 MHz: $52,0 + 60,7 + 32,4 = 145 \text{ dB}$. Un transmisor de 250 W es +54 dBm; potencia recibida $54 - 145 = -91 \text{ dBm}$, unos $8 \times 10^{-13} \text{ W}$.

Merece la pena detenerse en ese número: un receptor en un tejado está detectando una señal $10^{14,5}$ veces más débil que la que salió del avión, una millonésima de millonésima de vatio. Un buen receptor de aficionado decodifica hasta unos -100 dBm, así que hay 9 dB de margen a 400 km. Dicho de otro modo, el límite energético y el horizonte geométrico para un avión de línea en crucero caen en el mismo

lugar, y eso es por diseño: la potencia del transpondedor y las normas de los receptores se especificaron para que un avión sea audible hasta su horizonte y no mucho más allá, lo que impide que el canal se inunde con el tráfico del país vecino.

Dos refinamientos. El efecto Doppler: un avión que se acerca a 250 m/s desplaza la frecuencia recibida en $f v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Hz, menos de una parte por millón, algo que un receptor nunca nota; compáralo con el sonido del mismo avión, donde v / c es $250 / 343$ y el tono baja casi una octava al pasar. Y el tiempo de vuelo: 400 km a c son 1,33 ms, así que la posición emitida ya tiene 1,33 ms de antigüedad al llegar, tiempo en el que el avión se ha movido 33 cm; despreciable para un mapa, decisivo para la multilateración, que vive exactamente de esos microsegundos.

LECCIÓN 5

Antenas y receptores: de una onda de 27 centímetros a un punto en un mapa

Una antena es un conductor en el que una onda electromagnética que pasa induce una corriente alterna, y el mismo dispositivo, alimentado por una corriente, lanza una onda; las antenas receptoras y transmisoras son la misma cosa funcionando al revés. La corriente inducida es máxima en la resonancia, cuando la longitud del conductor permite que la distribución de corriente a lo largo de él encaje con la oscilación de la onda, como una cuerda de la longitud adecuada resuena con una nota concreta. La resonancia fundamental de un conductor recto está en media longitud de onda, 13,75 cm a 1090 MHz, con la corriente máxima en el centro y nula en los extremos. La antena ADS-B práctica, en los aviones y en la mayoría de los receptores, es un monopolo de cuarto de onda: un elemento vertical de 6,9 cm sobre un plano de tierra conductor, que lo refleja de modo que elemento e imagen forman juntos el dipolo de media onda. En el avión el plano de tierra es el fuselaje; una antena de 1090 MHz comprada esconde la misma geometría dentro de su tubo, apilada varias veces. Una antena casera se desintoniza con unos pocos milímetros de error y oye una fracción del cielo: por eso el receptor del proyecto usa una antena sintonizada de fábrica.

Un monopolo vertical es más sensible hacia el horizonte y nada en absoluto a lo largo de su propio eje; su sensibilidad en tres dimensiones es una rosquilla con la antena atravesando el agujero. Así que tu receptor oírás a la perfección aviones a 300 km y perderá durante unos segundos uno que pase justo por encima, y puedes verlo ocurrir. Una antena colineal, varios elementos resonantes apilados, aplanan la rosquilla y aumentan la sensibilidad en el horizonte a costa del agujero de la vertical: eso es la ganancia de antena, medida en dBi, y procede de redistribuir la sensibilidad, nunca de crearla. Y, de la lección 1, la antena debe estar vertical, porque la onda está polarizada verticalmente.

Entre la antena y un punto en el mapa hay cuatro etapas. Un filtro paso banda deja pasar 1090 MHz y rechaza las señales de telefonía móvil, mucho más fuertes, a unos pocos cientos de megahercios de distancia, que de otro modo saturarían todo lo que viene después. Un amplificador de bajo ruido en la antena multiplica la señal por mil antes del cable, que a 1090 MHz pierde unos 3 dB, la mitad de la señal, cada diez metros; amplifica después del cable y amplificarás también el ruido del cable. Una radio definida por software, un dispositivo USB de 20 euros vendido originalmente como sintonizador de televisión, baja la señal en frecuencia y la muestrea dos millones de veces por segundo en un flujo de números. A partir de aquí es programación: un programa libre recorre las muestras buscando el preámbulo, mide qué mitad de cada intervalo de un microsegundo lleva más energía, ensambla 112 bits,

calcula el CRC y, si lo supera, decodifica los campos. Un rastreador empareja después las tramas de posición par e impar, fusiona posición, velocidad e identidad por dirección ICAO, y conserva el estado de cada avión hasta que dejan de llegar mensajes, normalmente porque ha bajado por debajo del horizonte.

Dibuja esa cadena, con la magnitud en cada etapa: nanovoltios en la antena, microvoltios después del amplificador, dos millones de muestras por segundo a la salida de la radio, unos cientos de tramas por segundo a la salida del decodificador, un registro por avión a la salida del rastreador. Un punto en un mapa es el extremo final de una cadena en la que cada eslabón es una idea de este curso: resonancia, filtrado, amplificación, muestreo, búsqueda de patrones, decodificación, comprobación de errores, agregación. El proyecto consiste en construir la cadena y contrastar el curso con el cielo: mide tu alcance máximo frente a la altitud y compáralo con la fórmula del horizonte; compara la antena en el interior, en una ventana y en el tejado, vertical y horizontal; registra un día de tráfico y encuentra la hora de más actividad y la altitud de crucero típica; decodifica mensajes en bruto y verifica su CRC con tu propio código. Y después hazte las preguntas que el sistema plantea y no responde: los mensajes no están firmados, así que qué impide que alguien emita un avión fantasma; el avión depende de satélites que pueden sufrir interferencias, así que qué ve el controlador cuando eso ocurre; y los datos identifican aviones, que pueden identificar personas, así que quién debería poder seguir a quién.

Retos

Resuelve cada uno primero en papel. La comprobación muestra la respuesta y el razonamiento.

- 1. 1. ¿Cuál es la longitud de onda de la señal de 1090 MHz, y cuánto mide una antena de cuarto de onda para ella?**
- 2. 2. ¿Cuántas veces más rápido que el sonido es el mensaje? Un avión a 30 km emite ambos a la vez; ¿cuánto ha volado cuando llega el sonido?**
- 3. 3. El reloj de un receptor está desviado 2 microsegundos. ¿Qué error de distancia provoca, y por qué un receptor de satélites necesita cuatro satélites y no tres?**
- 4. 4. ¿Cuántos aviones pueden identificar 24 bits de dirección? ¿Cuánto dura un mensaje de 112 bits a 1 bit por microsegundo, y la transmisión completa con su preámbulo?**
- 5. 5. En el mensaje 8D4840D6..., ¿cuáles son el formato de enlace descendente y la capacidad, y cuál es la dirección ICAO?**
- 6. 6. Una antena receptora está a 15 m de altura. ¿Cuál es el horizonte radioeléctrico hasta un avión a 9 000 m, y hasta uno a 300 m?**
- 7. 7. ¿Por qué doblar la distancia reduce la potencia recibida a un cuarto? ¿Cuál es la pérdida de trayecto a 200 km, y cómo se compara con los 145 dB a 400 km?**

8. 8. Predice qué le pasa al alcance si la antena se tumba en horizontal, y si el receptor se traslada del tejado a la planta baja.

A CONTINUACIÓN

Constrúyelo

Todo lo que cuentan estas lecciones puede comprobarse desde una ventana. El taller práctico te da la lista de la compra (unos 100 a 150 euros, o una Raspberry Pi que ya tengas), la antena que elegir y dónde ponerla, las tres órdenes que instalan el feeder de Dataero y las mediciones que ponen a prueba las fórmulas contra aviones reales: el horizonte radioeléctrico, la ley del inverso del cuadrado, el ritmo diario. Cuando tu receptor alimente el mapa, cada avión que oiga se dibujará para todo el mundo, con el nombre de tu estación.

Abrir el taller práctico <https://radar.dataero.eu/es/learning/workshop>

Respuestas

1. 1. ¿Cuál es la longitud de onda de la señal de 1090 MHz, y cuánto mide una antena de cuarto de onda para ella?
 $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275 \text{ m}$. Un elemento de cuarto de onda mide 6,9 cm. La velocidad fija de la luz obliga a que frecuencia y longitud de onda sean inversamente proporcionales.
2. 2. ¿Cuántas veces más rápido que el sonido es el mensaje? Un avión a 30 km emite ambos a la vez; ¿cuánto ha volado cuando llega el sonido?
 $3,00 \times 10^8 / 343 = \text{unas } 875\,000 \text{ veces}$. El mensaje llega en 100 microsegundos, el sonido en 87 s, tiempo en el que el avión, a 250 m/s, vuela 22 km.
3. 3. El reloj de un receptor está desviado 2 microsegundos. ¿Qué error de distancia provoca, y por qué un receptor de satélites necesita cuatro satélites y no tres?
 $2 \times 10^{-6} \text{ s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 600 \text{ m}$. Tres satélites fijan x, y y z solo si el reloj es perfecto; el desfase del reloj es una cuarta incógnita, así que hace falta un cuarto satélite.
4. 4. ¿Cuántos aviones pueden identificar 24 bits de dirección? ¿Cuánto dura un mensaje de 112 bits a 1 bit por microsegundo, y la transmisión completa con su preámbulo?
 $2^{24} = 16\,777\,216$. Los datos duran 112 microsegundos; con el preámbulo de 8 microsegundos, 120 microsegundos.
5. 5. En el mensaje 8D4840D6..., ¿cuáles son el formato de enlace descendente y la capacidad, y cuál es la dirección ICAO?
8D = 1000 1101. Los primeros cinco bits, 10001 = 17: DF 17, ADS-B desde un transpondedor Mode S. Los tres bits siguientes, 101 = 5: CA 5. La dirección ICAO es 4840D6, asignada a los Países Bajos.
6. 6. Una antena receptora está a 15 m de altura. ¿Cuál es el horizonte radioeléctrico hasta un avión a 9 000 m, y hasta uno a 300 m?
 $d = 4,12 \times (\sqrt{15} + \sqrt{9000}) = 4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407 \text{ km}$. Para 300 m: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87 \text{ km}$.
7. 7. ¿Por qué doblar la distancia reduce la potencia recibida a un cuarto? ¿Cuál es la pérdida de trayecto a 200 km, y cómo se compara con los 145 dB a 400 km?
 La potencia transmitida se reparte sobre una esfera de área $4 \pi d^2$, que es cuatro veces mayor al doble de distancia. A 200 km: $20 \log_{10}(200) + 20 \log_{10}(1090) + 32,44 = 46,0 + 60,7 + 32,4 = 139 \text{ dB}$, 6 dB (un factor cuatro) menos que a 400 km.
8. 8. Predice qué le pasa al alcance si la antena se tumba en horizontal, y si el receptor se traslada del tejado a la planta baja.
 Horizontal: la antena está en polarización cruzada respecto a la onda vertical; la corriente inducida depende de la componente del campo a lo largo del conductor, así que oye muy poco. Planta baja: el término del horizonte $4,12 \sqrt{h_1}$ se reduce y los edificios bloquean la línea de visión, así que el alcance cae bruscamente, sobre todo para los aviones bajos.