

DE 12 A 18 AÑOS - PARA EL DOCENTE

Descifrar el cielo: física e informática a través de un sistema real

Cinco lecciones y un proyecto. Cada lección toma una parte del ADS-B y desarrolla por completo la física o la informática que hay detrás: deducciones donde la clase pueda seguir las, ejemplos resueltos con números reales, las demostraciones que hacen observable la idea, y los puntos donde la intuición de los estudiantes falla. El extremo más joven del tramo (12 a 14) sigue las ideas y la aritmética; el extremo mayor (15 a 18) sigue las deducciones y realiza el proyecto.

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

CONTENIDO

Antes de empezar: por qué un sistema real merece cinco lecciones

LECCIÓN 1 - FÍSICA Ondas y espectro

electromagnético: en qué viaja el mensaje

LECCIÓN 2 - FÍSICA Y MATEMÁTICAS Tiempo y

posición: cómo sabe el avión dónde está, y cómo una red encuentra uno que no lo dice

LECCIÓN 3 - INFORMÁTICA El mensaje digital: 112 bits, cómo se envían y cómo se detectan los errores

LECCIÓN 4 - FÍSICA Propagación y alcance: la curva de la Tierra y la ley del inverso del cuadrado

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

PROYECTO - DE DOS A CUATRO SEMANAS Construir un receptor y contrastar la física con el cielo

Respuestas a los retos del estudiante

A CONTINUACIÓN El proyecto, paso a paso

Antes de empezar: por qué un sistema real merece cinco lecciones

La mayor parte de la física que se enseña entre los 12 y los 18 años se enseña a trozos: una unidad de ondas aquí, otra sobre el espectro electromagnético allá, un tema de datos digitales en informática, una mención a los satélites en geografía. El ADS-B es un único sistema en funcionamiento en el que todas esas piezas sostienen carga a la vez, y en el que la clase puede observar el resultado con un receptor que cuesta menos que un libro de texto. Un avión fija su posición cronometrando señales de radio de satélites, que es trilateración y velocidad de la luz. Codifica el resultado en 112 bits con una comprobación de redundancia cíclica, que es codificación binaria y detección de errores. Los transmite como una onda de radio con modulación por posición de pulsos a 1090 MHz, que es el espectro, la frecuencia y la longitud de onda. La onda llega a un receptor solo a lo largo de una línea recta que libra la curva de la Tierra, y llega debilitada según el inverso del cuadrado de la distancia, que es geometría y energía. Una antena afinada de un cuarto de longitud de onda la convierte en una corriente, que es resonancia. Y una red de receptores puede localizar incluso un transmisor silencioso a partir de las diferencias de tiempo de llegada, que es el problema del satélite vuelto del revés. Cada lección de abajo toma una de estas piezas y la desarrolla por derecho propio, con el ADS-B como ejemplo conductor y no como decoración.

El curso de referencia de la página de inicio presenta el sistema completo en forma narrativa, y la clase debería leer sus capítulos 3 y 5 antes de la lección 3, y los capítulos 6 a 8 antes de las lecciones 4 y 5; su glosario es un buen material para repartir. Esta página da por hecho que usted lo ha leído y se concentra en la física y en la enseñanza. Las convenciones numéricas son coherentes en todo el texto: $c = 3,00 \times 10^8$ m/s, $f = 1090$ MHz, alturas en metros, distancias en kilómetros, y el avión en crucero tomado a 11 000 m (nivel de vuelo 360) y 250 m/s salvo que el ejemplo diga otra cosa.

Dos advertencias sobre la intuición. Los estudiantes llegan creyendo que las ondas de radio son una clase de sonido y que el "radar" o los "satélites" ven los aviones. Ambas cosas son falsas, ambas se tratan explícitamente en las lecciones 1 y 2, y ambas reaparecerán; el curso está diseñado para que cada lección posterior le dé una nueva razón para corregirlas. Y los estudiantes que se manejan bien con las fórmulas a menudo no se manejan bien con las magnitudes: el curso se apoya mucho en preguntar "¿cómo de grande es eso?" en cada paso, porque 300 m por microsegundo, 145 dB de pérdida de trayecto y 2^{24} direcciones son la clase de números que hacen que la física parezca real.

LECCIÓN 1 - FÍSICA

Ondas y espectro electromagnético: en qué viaja el mensaje

Empiece por la observación sobre la que descansa todo el curso: el mensaje de radio de un avión y un haz de luz son el mismo fenómeno físico. Ambos son ondas electromagnéticas, campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan por el espacio sin ningún medio, a una velocidad c que es la misma para todas las frecuencias en el vacío y casi exactamente la misma en el aire: 299 792 458 m/s, que la clase puede tomar como $3,00 \times 10^8$ m/s. La magnitud que distingue la radio de la luz visible, y la luz visible de los rayos X, es únicamente la frecuencia f de la oscilación. Nuestras retinas responden a frecuencias entre unos 4×10^{14} y 8×10^{14} Hz, que percibimos del rojo al violeta; el ADS-B se transmite a $1,09 \times 10^9$ Hz, aproximadamente medio millón de veces menos. Nada en la onda es distinto en su naturaleza; solo nuestros ojos son selectivos.

Deduzca la ecuación de onda para la clase en lugar de enunciarla. Si una onda viaja a velocidad c y oscila f veces por segundo, en un segundo ha avanzado una distancia c y ha producido f ciclos completos; cada ciclo ocupa por tanto una longitud c / f . Esa longitud es la longitud de onda, λ , y así $c = f \times \lambda$. Aplicado al ADS-B: $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. El mensaje entre el avión y el receptor tiene crestas separadas 27,5 cm. Haga que la clase lo sitúe en un espectro dibujado por ellos mismos, en un eje logarítmico: la radio FM a 100 MHz y 3 m, el ADS-B a 1 090 MHz y 27,5 cm, los teléfonos móviles a 1 800 MHz y 17 cm, el Wi-Fi y los hornos microondas a 2 450 MHz y 12 cm, el infrarrojo, la luz visible a $5,6 \times 10^{14}$ Hz y 540 nm, y así hasta los rayos X. El ejercicio de colocar la onda del avión entre un teléfono y un horno vale más que cualquier tabla, porque deja claro que son vecinos.

Ahora afronte directamente la confusión con el sonido, porque es universal y porque el contraste enseña ambos fenómenos. El sonido es una onda longitudinal de presión en un medio; su velocidad es una propiedad del medio, 343 m/s en el aire a 20 grados, unos 1 500 m/s en el agua, y cero en el vacío. La radio es una onda electromagnética transversal que no necesita ningún medio, y viaja a c en el vacío e imperceptiblemente más despacio en el aire. Ponga un número a la diferencia: $3,00 \times 10^8$ dividido entre 343 es alrededor de 875 000. Un avión a 30 km que emite un sonido y un mensaje en el mismo instante entrega el mensaje en 100 microsegundos y el sonido en 87 segundos; cuando llega el sonido, el avión ha volado 22 km. La demostración es una cuerda en el aula y una linterna a través del campo de

deportes: una onda en una cuerda necesita visiblemente la cuerda y viaja a una velocidad que la cuerda fija, y un destello de linterna llega al otro extremo sin ningún retraso que nadie pueda medir. Enumere explícitamente lo que la cuerda comparte con la luz (una onda, una longitud de onda, una frecuencia, una velocidad fija y por tanto una relación inversa entre f y λ) y lo que no (un medio, una velocidad de metros por segundo).

Termine con la polarización, que es fácil de mostrar y rinde en la lección 5. El campo eléctrico de una onda electromagnética oscila en una dirección definida, perpendicular a su avance. Las antenas de los transpondedores de los aviones son verticales, así que la onda ADS-B está polarizada verticalmente; una antena receptora también debe estar vertical, y puesta en horizontal apenas oye nada. Una onda en una cuerda agitada verticalmente pasa por una ranura vertical en una caja de cartón y es detenida por una horizontal; dos trozos de lámina polarizadora (de unas gafas 3D baratas) cruzados contra una ventana muestran lo mismo con la luz. Pida a la clase que prediga qué pasa con la recepción si una antena receptora se tumba. Pondrán a prueba la predicción en el proyecto.

Ejemplo resuelto para proponer

El segundo sistema ADS-B, usado por las avionetas en Estados Unidos, transmite a 978 MHz. ¿Cuál es su longitud de onda, y cuánto mediría una antena de cuarto de onda para él? (0,307 m; 7,7 cm.)
Un estudiante que sabe hacer esto tiene la lección 1.

LECCIÓN 2 - FÍSICA Y MATEMÁTICAS

Tiempo y posición: cómo sabe el avión dónde está, y cómo una red encuentra uno que no lo dice

Todo lo que el avión emite sobre su posición procede de la navegación por satélite, y la navegación por satélite es, en el fondo, una medición de tiempo. Cada satélite GNSS, en órbita a unos 20 200 km, lleva un reloj atómico y transmite una señal que indica su propia posición y el instante exacto de la transmisión. Un receptor anota el instante de llegada. La diferencia, multiplicada por c , es la distancia a ese satélite, y una sola distancia así sitúa al receptor sobre una esfera de ese radio centrada en el satélite. Deje que la clase deduzca el recuento: dos esferas se cortan en una circunferencia, tres en dos puntos, uno de los cuales está lejos de la superficie de la Tierra y puede descartarse. Así que tres satélites bastan, con un reloj perfecto en el receptor. No tiene nada parecido; un oscilador de cuarzo deriva mucho más que los nanosegundos necesarios. La solución, que es el elegante corazón del tema, es tratar el error del reloj del receptor como una cuarta incógnita y usar un cuarto satélite: cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas (x , y , z y el desfase del reloj), resueltas continuamente. Un receptor GNSS necesita, por tanto, cuatro satélites a la vista, y como subproducto mantiene la hora con una precisión de decenas de nanosegundos, y por eso los receptores de la red de la lección 5 usan los mismos satélites que el avión para sus relojes.

Ponga las magnitudes en la pizarra y vuelva a ellas una y otra vez. La luz recorre 0,300 m en un nanosegundo y 300 m en un microsegundo. Un error de tiempo de 1 microsegundo es un error de distancia de 300 m; la precisión de unos pocos metros de un receptor moderno corresponde a medir el tiempo a nivel de diez nanosegundos. El tiempo de viaje desde un satélite justo en la vertical es $20\,200\text{ km} / 3,00 \times 10^8\text{ km/s} = 0,0673\text{ s}$, y desde uno cerca del horizonte unos 0,086 s, de modo que el receptor mide diferencias de unos pocos milisegundos con una precisión de una cienmillonésima de eso.

Pregunte a la clase qué pasaría si el reloj de un satélite adelantara un microsegundo; deberían ver que todos los receptores que lo usaran se desplazarían unos 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.

Separe las dos altitudes, porque el mensaje lleva ambas y los estudiantes siempre preguntan. La solución por satélite da una altura geométrica sobre el elipsoide de referencia de la Tierra. Los aviones, sin embargo, notifican la altitud barométrica: la presión estática fuera del fuselaje convertida en altura mediante la Atmósfera Estándar Internacional, que supone 1013,25 hPa y 15 grados al nivel del mar y un descenso de 6,5 grados por kilómetro. Un día en que la presión real difiere de la estándar, la altitud barométrica de todos los aviones está equivocada en la misma cantidad, que es exactamente 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. Los mensajes de posición ADS-B llevan la altitud barométrica en pasos de 25 pies; el mensaje de velocidad lleva la diferencia entre la altura barométrica y la geométrica, de modo que un receptor puede recuperar ambas. Para el grupo mayor, la relación de la ISA $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ es un buen ejercicio de hoja de cálculo: inviértala para hallar h a partir de p y compruebe que 11 000 m corresponden a unos 227 hPa, una quinta parte de la presión al nivel del mar.

Ahora dé la vuelta al problema. Algunos aviones transmiten en 1090 MHz sin posición por satélite: transpondedores antiguos que responden al radar solo con identidad y altitud, o aviones cuyo GNSS sufre interferencias. Una red de receptores puede localizarlos de todos modos. Supongamos que cuatro receptores con relojes sincronizados registran el instante de llegada de la misma transmisión. El transmisor es desconocido, los receptores son conocidos: es el problema del GNSS con los papeles de conocido y desconocido intercambiados. 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 el lugar geométrico de esos puntos es un hiperboloide con A y B como focos. Tres pares independientes de cuatro receptores dan tres hiperboloides, cuya intersección es el avión. Esto es la multilateración, y necesita que los relojes de los receptores concuerden hasta unos 100 ns, cosa que obtienen de los satélites. Para la clase, redúzcalo a dos dimensiones con el ejercicio del patio: tres estudiantes con cronómetros en puntos medidos, un cuarto escondido en algún sitio da una palmada, los tres anotan sus retrasos corregidos por el tiempo de reacción, y la clase traza las hipérbolas (o, más sencillo, prueba posiciones sobre un dibujo a escala) para encontrar al que dio la palmada, usando 343 m/s. Después pregunte qué precisión de tiempo haría falta para hacer lo mismo con radio a 200 km, y deje que sientan la distancia entre un cronómetro y un reloj atómico.

Ejemplo resuelto para proponer

Dos receptores separados 60 km registran un mensaje con 50 microsegundos de diferencia. ¿Cuánto más cerca del primer receptor estaba el avión? (15 km.) Si los relojes estuvieran desfasados entre sí 1 microsegundo, ¿qué error introduciría eso en la respuesta? (300 m.) Un estudiante que sabe explicar por qué la segunda respuesta no depende de la distancia ha entendido lo que exige la multilateración.

LECCIÓN 3 - INFORMÁTICA

El mensaje digital: 112 bits, cómo se envían y cómo se detectan los

errores

El transpondedor del avión envía sus datos ADS-B como un squitter extendido de Mode S: un preámbulo de 8 microsegundos seguido de 112 bits de datos a exactamente un bit por microsegundo. Empiece la lección por el preámbulo, porque responde a una pregunta que los estudiantes aún no se han planteado: ¿cómo sabe un receptor que ha empezado un mensaje, cuando el canal está lleno de ruido y de otros aviones? El preámbulo es un patrón fijo de cuatro pulsos a 0, 1, 3,5 y 4,5 microsegundos. Un decodificador está buscando constantemente ese patrón; cuando lo encuentra, sabe tanto que sigue un mensaje como exactamente cuándo empieza cada intervalo de bit. Todo protocolo digital que los estudiantes han conocido, del Wi-Fi a un código QR, tiene un equivalente, y es un buen momento para decirlo.

Después, la modulación. Una radio puede estar encendida o apagada; ¿cómo se 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 dos mitades, y un pulso en la primera mitad seguido de silencio significa 1, silencio seguido de un pulso significa 0. Dibuje unos cuantos bits en la pizarra como pulsos y haga que la clase los lea. Después pregunte por qué esto es mejor que el esquema obvio de "pulso significa 1, sin pulso significa 0". Con un poco de ayuda surgen dos razones. Siempre hay exactamente un pulso por bit, así que el receptor puede mantener su sincronización incluso a través de una racha de ceros, y puede decidir cada bit preguntando qué mitad sonó más fuerte en lugar de si un pulso superó algún umbral absoluto, lo que hace que la decodificación sea insensible a la intensidad que tenga la señal. Una larga racha de ceros en el esquema ingenuo sería indistinguible del silencio; en PPM es un tamborileo constante de pulsos en la segunda mitad.

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.

Ahora la disposición de los 112 bits, que la clase debería poder reproducir de memoria al final de la lección. Los bits 1 a 5 son el formato de enlace descendente, 17 para ADS-B desde un transpondedor. Los bits 6 a 8 son un código de capacidad. Los bits 9 a 32 son la dirección ICAO de 24 bits, la identidad permanente del avión. Los bits 33 a 88 son el campo de mensaje de 56 bits, cuyos primeros cinco bits, el código de tipo, indican qué contienen los 51 restantes: un mensaje de identificación (códigos de tipo 1 a 4) lleva el indicativo de ocho caracteres como ocho caracteres de 6 bits; una posición en vuelo (9 a 18) lleva 12 bits de altitud barométrica, un indicador que dice si esta es una trama par o impar, y 17 bits de latitud y 17 de longitud codificadas; un mensaje de velocidad (19) lleva las 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. Los bits 89 a 112 son la paridad de 24 bits. Proponga la aritmética: 24 bits de dirección dan $2^{24} = 16\,777\,216$ aviones; ocho caracteres de 6 bits permiten 64 símbolos cada uno, suficientes para letras, cifras y espacio; 12 bits de altitud en pasos de 25 pies cubren 102 400 pies; y 17 bits de latitud, si se usaran ingenuamente sobre 180 grados, solo resolverían 1,4 km, lo que plantea la pregunta que responde la notificación compacta de posición. Explique la CPR en un párrafo: los 17 bits

dan la posición dentro de una zona con precisión de unos metros, no cuál es la zona; el avión alterna entre dos rejillas de zonas, par e impar, y un receptor que tiene una de cada puede resolver la zona sin ambigüedad y después seguir la traza a partir de mensajes sueltos. Es un buen ejemplo de cómo obtener más precisión de los mismos bits usando el tiempo.

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

Dé a la clase un mensaje real y deje que lo diseccionen. La cadena hexadecimal 8D4840D6202CC371C32CE0576098 tiene 28 dígitos hexadecimales, 112 bits. Convertir los dos primeros dígitos, 8D, a binario da 10001 101: DF = 17, CA = 5. Los seis dígitos siguientes, 4840D6, son la dirección ICAO, que las tablas de asignación atribuyen a los Países Bajos. Los dígitos siguientes, 20..., empiezan 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 últimos dígitos, 576098, son la paridad. Una clase con una hoja de cálculo o unas pocas líneas de Python puede hacer la decodificación completa en una lección, y la capacidad de tomar una cadena hexadecimal y decir "eso es un avión de KLM anunciando su número de vuelo" es el resultado al que apuntar.

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: formato de enlace descendente 17, capacidad 5. 4840D6: dirección ICAO, asignada a los Países Bajos. 20...: código de tipo 4, identificación, indicativo KLM1023. 576098: la paridad de 24 bits.

Termine con la paridad, porque es la idea informática que más merece desarrollarse. Sobre un aeropuerto concurrido, los mensajes de distintos aviones se solapan constantemente en un receptor, y los pulsos también se pierden por el ruido; un decodificador ensamblará inevitablemente bits erróneos. El campo de 24 bits del final es una comprobación de redundancia cíclica: los 88 bits del mensaje se tratan como un número binario largo y se dividen, en una aritmética especial en la que la resta es la o exclusiva (XOR), entre un generador fijo de 25 bits; el resto es el CRC. El receptor repite la división sobre los bits que decodificó y compara. Cualquier bit corrupto, cualesquiera dos, y cualquier ráfaga de errores de hasta 24 bits cambia el resto, de modo que el mensaje corrupto se rechaza. Demuestre la idea a pequeña escala con un CRC de 4 bits sobre un mensaje de 8 bits hecho a mano, o con el análogo más sencillo de un dígito de control en un código de barras; después haga que el grupo mayor implemente el CRC-24 real en unas pocas líneas de código y verifique que la paridad del mensaje de ejemplo sale bien, y que invertir un solo bit la hace fallar. Esto es la detección de errores tal como la hace todo sistema moderno, encontrada en un contexto en el que un error no detectado podría poner un avión fantasma en la pantalla de un controlador.

Ejemplo resuelto para proponer

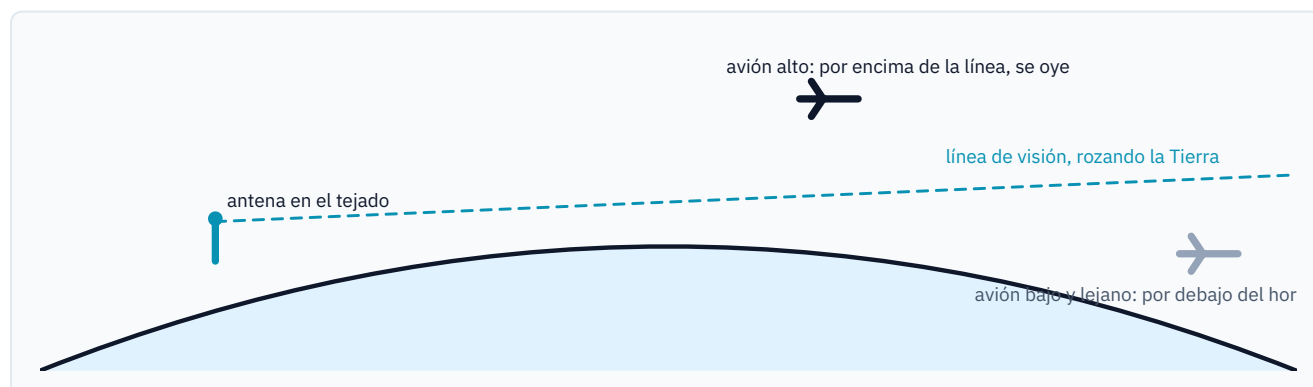
¿Cuánto dura una transmisión completa, y si un transpondedor envía 4,5 squitters extendidos por segundo, qué fracción del tiempo está transmitiendo ADS-B? (120 microsegundos; 540 microsegundos por segundo, 0,054 por ciento.) ¿Cuántos aviones podrían en principio compartir el canal antes de que estuviera continuamente ocupado, ignorando todo lo demás que se transmite en él? (Unos 1 850, y por eso la congestión sobre el espacio aéreo más cargado es una preocupación real de ingeniería.)

LECCIÓN 4 - FÍSICA**Propagación y alcance: la curva de la Tierra y la ley del inverso del cuadrado**

¿A qué distancia puede un receptor oír un avión? La pregunta tiene dos respuestas independientes, una geométrica y otra energética, y el propósito de la lección es deducir ambas y descubrir que los diseñadores se las arreglaron para que coincidieran. Tome primero la geometría. A 1090 MHz, la radio no se difracta de forma útil alrededor de la Tierra; se comporta como la luz y viaja en línea recta. Un receptor, por tanto, solo puede oír aviones por encima de su horizonte, es decir, aviones desde los que una línea recta hasta la antenna no atraviesa el suelo. Deduzca la distancia al horizonte con la clase. Una antenna a altura h sobre una esfera de radio R ve un horizonte donde su línea de visión es tangente a la esfera. La tangente, el radio hasta el punto de tangencia y el radio hasta la antenna forman un ángulo recto en el punto de tangencia, así que por Pitágoras $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, lo que da $d^2 = 2Rh + h^2$. Como h es minúscula frente a R , $d = \sqrt{2Rh}$. Con $R = 6\,371$ km y h en metros, d en kilómetros = $\sqrt{2 \times 6371 \times h / 1000} = 3,57 \sqrt{h}$. La densidad de la atmósfera, y con ella su índice de refracción, disminuye con la altura, lo que curva los rayos de radio ligeramente hacia abajo; 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 antenna 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: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451$ km. Misma antenna, avión a 1 000 m: $4,12 \times (4,47 + 31,6) = 149$ km. Avión en la pista a 30 m: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27$ km, así que no se oye.



Haga que la clase represente d frente a h_2 para la altura de la antenna de su propia escuela; la curva, empinada al principio y luego cada vez más plana, explica la forma de la cobertura de cualquier receptor: un círculo de 400 km y más para el tráfico en crucero, unas pocas decenas de kilómetros para los

aviones en aproximación, y nada en tierra salvo en el aeropuerto de al lado. También explica por qué la altura importa más que cualquier otra propiedad de un receptor, y por qué una colina entre usted y el aeropuerto, o el ala del propio avión cuando se inclina alejándose, corta una traza al instante. La demostración del patio del curso de primaria, ver más lejos desde un banco que agachado, no es indigna de esta edad si la hace seguir de la deducción; lo importante es que ahora saben por qué.

Ahora la energía. Un transpondedor radia una potencia de pico de 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 $4\pi d^2$, de modo que la potencia interceptada por una antena de área efectiva fija disminuye como $1/d^2$: la ley del inverso del cuadrado, que la clase debería 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 de radio expresan la pérdida entre un transmisor isótropo y un receptor isótropo en decibelios, y la fórmula estándar, que el grupo mayor puede aceptar sin demostración o deducir del área efectiva de una antena, $\lambda^2 / 4\pi$, 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: $20 \times 2,60 + 20 \times 3,04 + 32,44 = 52,0 + 60,7 + 32,4 = 145$ dB. Un transmisor de 250 W es +54 dBm; la potencia recibida es $54 - 145 = -91$ dBm, unos 8×10^{-13} W, es decir, una millonésima de millonésima de vatio.

Dedique unos minutos a los decibelios si la clase no los ha visto, porque convierten una multiplicación a lo largo de catorce órdenes de magnitud en una suma, y porque el número en sí es instructivo: un receptor en un tejado está detectando una señal $10^{14,5}$ veces más débil que la que salió del avión. Un buen receptor de aficionado puede decodificar hasta alrededor de -100 dBm, así que hay unos 9 dB de margen a 400 km, lo que equivale a decir que el límite energético y el horizonte geométrico para un avión de línea en crucero caen en el mismo lugar. No es casualidad; la potencia del transpondedor y las normas de los receptores se especificaron para que un avión sea audible hasta el horizonte y no mucho más allá, lo que evita que el canal se inunde con transmisiones del país vecino.

Dos refinamientos para el grupo mayor. Primero, el efecto Doppler: un avión que se acerca a 250 m/s desplaza la frecuencia recibida en $f \times v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Hz, menos de una parte por millón de la portadora, algo que un receptor nunca nota; contrástelo con el desplazamiento Doppler audible del sonido del avión, donde v / c es $250 / 343$ y el tono cambia casi una octava al pasar. Segundo, el tiempo de vuelo de la señal: 400 km a c son 1,33 ms, así que la posición del mensaje ya tiene 1,33 ms de antigüedad, tiempo en el que el avión se ha movido 33 cm; despreciable para un mapa, decisivo para la multilateración de la lección 2, que vive exactamente de esos microsegundos.

Ejemplo resuelto para proponer

Un receptor en un mástil de 10 m oye un avión en crucero a 11 000 m pero no una avioneta a 600 m que está a 130 km. ¿Está la avioneta por debajo del horizonte? (Horizonte: $4,12 \times (3,16 + 24,5) = 114$ km, así que sí.) ¿A qué altura tendría que estar el receptor para oírla? (Hace falta $4,12 \times (\sqrt{h_1} + 24,5) = 130$, así que $\sqrt{h_1} = 7,05$, $h_1 = 50$ m.)

LECCIÓN 5 - FÍSICA E INGENIERÍA

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; la antena receptora y la antena transmisora son el mismo dispositivo funcionando en sentidos opuestos, una reciprocidad que conviene decir explícitamente a la clase. La corriente inducida es máxima cuando el conductor resuena: cuando su longitud es tal que la distribución de corriente a lo largo de él encaja con la oscilación de la onda, exactamente como una cuerda de la longitud adecuada resuena con una nota concreta, o un columpio con un ritmo concreto de empujones. 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 el avión y en la mayoría de los receptores, es un monopolo de cuarto de onda: un elemento vertical de 6,9 cm de pie sobre un plano de tierra conductor, que lo refleja eléctricamente 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 para concentrar su sensibilidad hacia el horizonte. Una maqueta construida en clase con una varilla de 6,9 cm sobre la tapa de una lata muestra la geometría y la longitud, medida con una regla frente a la onda de 27,5 cm; el receptor del proyecto, sin embargo, usa la antena sintonizada de fábrica, porque unos pocos milímetros de error desintonizan una casera y oye una fracción del cielo.

Desarrolle el diagrama de radiación, porque predice algo que la clase puede observar. Un monopolo vertical radia y recibe con más intensidad hacia el horizonte y nada en absoluto a lo largo de su propio eje; su sensibilidad, representada en tres dimensiones, es una rosquilla con la antena atravesando el agujero. Así que un receptor oye normalmente a la perfección aviones a 300 km y pierde durante unos segundos uno que pasa justo por encima, y la clase puede verlo ocurrir en su propio receptor. Una antena colineal, varios elementos resonantes apilados, aplasta la rosquilla, aumentando la sensibilidad en el horizonte, donde están los aviones lejanos, a costa del agujero de la vertical: eso es la ganancia de antena, expresada en dBi, y procede de redistribuir la sensibilidad, nunca de crearla. La polarización, de la lección 1, tiene ahora una consecuencia práctica que el proyecto pondrá a prueba: la antena debe estar vertical.

Entre la antena y el ordenador hay tres etapas, cada una una pequeña lección. Un filtro paso banda deja pasar 1090 MHz y rechaza las transmisiones de telefonía móvil, mucho más fuertes, a unos pocos cientos de megahercios de distancia, que de otro modo saturarían el amplificador. Un amplificador de bajo ruido, colocado en la antena y no en el receptor, multiplica la señal por mil antes de que entre en el cable; el orden importa, porque un cable coaxial a 1090 MHz pierde aproximadamente la mitad de la señal, 3 dB, cada diez metros, y amplificar después de la pérdida amplificaría el ruido del cable junto con la señal. Después, la radio definida por software: un dispositivo USB de 20 euros fabricado originalmente como sintonizador de televisión, que mezcla la señal hacia la banda base y la muestrea dos millones de veces por segundo en un flujo de números. A partir de ese punto, el problema de radio es un problema de programación. Un programa libre recorre el flujo de muestras buscando el patrón del 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 identificación por dirección ICAO, y conserva el estado de cada avión hasta que dejan de llegar mensajes.

Entregue la cadena a la clase como un diagrama que dibujen ellos mismos, con la magnitud en cada etapa: nanovoltios de corriente alterna en la antena; microvoltios después del amplificador; dos millones de números de 8 bits por segundo a la salida de la SDR; tramas de 112 bits a la salida del decodificador, quizá unos cientos por segundo; un registro por avión a la salida del rastreador. La idea que debe quedar es que un punto en un mapa es el extremo final de una cadena en la que cada eslabón es una idea que ahora entienden: resonancia, filtrado, amplificación, muestreo, búsqueda de patrones, decodificación, comprobación de errores, agregación.

Ejemplo resuelto para proponer

Un cable pierde 3 dB cada 10 m a 1090 MHz. Un tramo de 20 m pierde, por tanto, ¿qué fracción de la señal? (6 dB, tres cuartos.) Si el límite del receptor es -100 dBm y la señal en la antena de un avión a 400 km es -91 dBm, ¿puede la señal sobrevivir al cable sin amplificador? (Por los pelos: -97 dBm. Cualquier pérdida adicional, lluvia en los conectores o un tramo más largo, y el avión del horizonte desaparece. Por eso el amplificador va en la antena.)

PROYECTO - DE DOS A CUATRO SEMANAS

Construir un receptor y contrastar la física con el cielo

El proyecto convierte las cinco lecciones en mediciones. El equipo es un dongle USB de radio definida por software (unos 25 euros), una antena de 1090 MHz sintonizada de fábrica (de 50 a 70 euros), unos metros de cable coaxial, y un portátil o una Raspberry Pi con uno de los decodificadores libres (dump1090 y sus descendientes son el estándar). La instalación lleva una tarde y el programa muestra, en cuestión de minutos, una tabla de aviones con sus direcciones ICAO, indicativos, posiciones, altitudes y velocidades, y un mapa. Todo en el proyecto es solo recepción; nada transmite, y la clase debe entender que transmitir en frecuencias aeronáuticas sería a la vez ilegal y peligroso. El acceso al tejado requiere la aprobación habitual del centro; una ventana en un piso alto orientada hacia los principales flujos de tráfico es un comienzo perfectamente válido. La página Hazte feeder de este sitio recorre la misma instalación paso a paso y permite que el receptor de la escuela alimente el mapa en vivo.

La primera investigación es el horizonte radioeléctrico. El decodificador informa, para cada avión, de la distancia y la altitud a las que se oyó por última vez. A lo largo de un día, recojan el alcance máximo al que se recibieron aviones en varias bandas de altitud y representen el alcance frente a la altitud. Los estudiantes tienen la fórmula de la lección 4 y la altura de la antena; deberían predecir la curva antes de ver los datos, y después comparar. La concordancia suele ser buena para los aviones altos y peor para los bajos, y la discusión del porqué (edificios, relieve, el agujero de la vertical de la antena, la sombra del propio avión) es la clase de confrontación entre teoría y medición que un libro de texto no puede ofrecer. Un mapa de los aviones más lejanos oídos en cada dirección, que el programa dibuja, muestra el relieve de toda la región como sombras en la cobertura.

La segunda es la antena. Comparen las tasas de mensajes y el alcance máximo con la antena en el interior, en una ventana y en el tejado; vertical y tumbada en horizontal; de pie sobre una superficie metálica y alejada de cualquier metal. Cada comparación pone a prueba una afirmación concreta de las lecciones 1 y 5, y cada resultado debería predecirse primero. La prueba de polarización es la más llamativa: tumbada, la antena pierde la mayoría de sus aviones.

La tercera son los datos. Registren un día completo de tráfico y háganle preguntas: la hora de más actividad, la distribución de altitudes de crucero (los estudiantes esperan una dispersión y encuentran la mayoría de los aviones de línea entre 10 000 y 12 000 m), la velocidad de ascenso de las salidas del aeropuerto más cercano, los Estados cuyos aviones pasan con más frecuencia (a partir de la asignación de direcciones ICAO). El grupo mayor puede decodificar mensajes en bruto por sí mismo, a partir del hexadecimal que el programa registra, y verificar el CRC con su propio código. Una clase con un segundo receptor en una escuela asociada a 30 o más kilómetros, ambos con salida marcada con tiempo GNSS, puede intentar una multilateración en dos dimensiones de un avión que ambos oyen y compararla con la posición que el avión emitió: el resultado más ambicioso del curso, y uno real.

Termine con las preguntas que el sistema plantea y no responde. Los mensajes no están firmados, así que un transmisor podría emitir un avión fantasma; ¿qué defiende al sistema, y qué costaría una versión firmada? El avión depende de satélites que pueden sufrir interferencias; ¿qué le pasa a la imagen de un controlador cuando ocurre? Los datos identifican aviones, y un avión puede identificar a una persona; ¿quién debería poder seguir a quién? Una clase que ha construido el receptor se ha ganado estas preguntas, y son un buen ensayo final o debate.

Respuestas a los retos del estudiante

La página del estudiante plantea ocho retos, uno o dos por lección, que pueden usarse como deberes o como prueba de fin de curso. Las respuestas, con el razonamiento que debería contener una respuesta de nota máxima:

1. Longitud de onda a 1090 MHz: $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. Elemento de cuarto de onda: 6,9 cm. Razonamiento: $c = f \times \lambda$, con la velocidad fija de la luz imponiendo una relación inversa.
2. La luz es más rápida que el sonido en un factor $3,00 \times 10^8 / 343$, unas 875 000 veces. A 30 km el mensaje tarda 100 microsegundos y el sonido 87 s; el avión, a 250 m/s, se mueve 22 km en ese tiempo.
3. Un error de reloj de 2 microsegundos da un error de distancia de $2 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 = 600$ m. Hacen falta cuatro satélites porque el desfase del reloj del receptor es una cuarta incógnita junto a x, y y z.
4. $2^{24} = 16\,777\,216$ direcciones. Un mensaje de 112 bits a 1 bit por microsegundo dura 112 microsegundos, 120 con el preámbulo.
5. En 8D4840D6..., 8D es 10001101: los primeros cinco bits, 10001, son 17, así que DF = 17, un mensaje ADS-B desde un transpondedor Mode S; los tres siguientes, 101, dan CA = 5. 4840D6 es la dirección ICAO.
6. Horizonte radioeléctrico desde una antena de 15 m hasta un avión a 9 000 m: $4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407$ km. Para un avión a 300 m: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87$ km.

7. Doblar la distancia reduce la potencia recibida a un cuarto, porque la misma potencia transmitida se reparte sobre una esfera de cuatro veces el área. Pérdida de trayecto a 200 km y 1090 MHz: $20 \times 2,30 + 60,7 + 32,4 = 139$ dB, 6 dB menos que a 400 km, coherente con un factor cuatro.
8. Una antena tumbada en horizontal está en polarización cruzada respecto a la onda polarizada verticalmente y recibe muy poco; la corriente inducida depende de la componente del campo eléctrico a lo largo del conductor. Un receptor en la planta baja pierde alcance porque su distancia al horizonte, $4,12 \times \sqrt{h_1}$, se reduce, y porque los edificios bloquean la línea de visión.

A CONTINUACIÓN

El proyecto, paso a paso

El proyecto de la lección 6 daba por supuesto un receptor; el taller práctico lo construye. Está escrito para alguien que nunca ha usado una Raspberry Pi: la lista de la compra con precios, la antena que elegir, su colocación y la pérdida del cable, la preparación de la Pi, las tres órdenes que instalan el feeder de Dataero, la reclamación de la estación, el ajuste de la ganancia y cinco mediciones, una por lección, que ponen a prueba la física contra el cielo. Una estación que alimenta Dataero da a la clase un panel, un mapa de cobertura y un año de historial con los que trabajar.

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