

CURSO DE REFERENCIA - PARA CUALQUIER ADULTO

Qué es el ADS-B y cómo funciona

Doce capítulos. No se presupone ningún conocimiento previo de aviación ni de radio; las matemáticas de secundaria bastan para los ejemplos resueltos, y estos pueden saltarse sin perder el hilo. Tiempo de lectura: unos 50 minutos.

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

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 El problema: un cielo lleno de aviones que nadie puede ver

CAPÍTULO 2 Antes del ADS-B: encontrar aviones con radar

CAPÍTULO 3 La idea: que el avión nos lo diga

CAPÍTULO 4 Cómo sabe el avión dónde está

CAPÍTULO 5 Anatomía de un mensaje

CAPÍTULO 6 - FÍSICA La onda: la radio como luz invisible

CAPÍTULO 7 - FÍSICA Alcance: la curva de la Tierra y el debilitamiento de la señal

CAPÍTULO 8 - FÍSICA Antenas: atrapar una onda de 27 centímetros

CAPÍTULO 9 Recibir y decodificar

CAPÍTULO 10 De un receptor a un mapa de un continente

CAPÍTULO 11 Para qué se usa y dónde se queda corto

CAPÍTULO 12 Una breve historia

Glosario

A CONTINUACIÓN De la teoría a la práctica: construya el receptor

CAPÍTULO 1

El problema: un cielo lleno de aviones que nadie puede ver

En un día laborable cualquiera, unos 30 000 vuelos cruzan el espacio aéreo europeo. Un avión de línea en crucero se mueve a unos 250 metros por segundo, es decir, 900 km/h; dos aviones que vuelan uno hacia el otro se acercan medio kilómetro cada segundo. Un piloto que mira por la ventana apenas ve nada de esto: a 10 000 metros, los demás aviones son puntos diminutos, y las nubes esconden la mayoría de todos modos. El cielo es una red de carreteras en tres dimensiones sin ninguna carretera pintada, y el tráfico que circula por ella es a la vez rápido e invisible.

El control del tráfico aéreo existe para mantener ese tráfico separado. Las reglas son sencillas en principio: en el espacio aéreo controlado, los aviones se mantienen al menos a 1 000 pies (unos 300 metros) de distancia en vertical, o a una distancia horizontal fija, normalmente 5 millas náuticas (9,3 km) con cobertura radar y mucho más sobre los océanos. Para aplicar las reglas, un controlador necesita conocer, de forma continua y fiable, la posición de cada avión en su sector: no dónde estaba hace un minuto, sino dónde está ahora, a qué altura y hacia dónde va. El tema entero de este curso es cómo se obtiene ese conocimiento. La palabra técnica es **vigilancia**.

Un número que conviene recordar

A 900 km/h, un avión recorre 15 km en un minuto y 250 m en un segundo. Cualquier método de vigilancia que se actualice despacio, o con un error grande, deja al controlador adivinando precisamente en las distancias que importan.

CAPÍTULO 2**Antes del ADS-B: encontrar aviones con radar**

La primera respuesta, desarrollada a finales de los años 30 y madurada durante la Segunda Guerra Mundial, fue el **radar primario**. Una gran antena giratoria emite un pulso corto y muy potente de energía de radio. Cuando el pulso alcanza un avión, una fracción diminuta se refleja de vuelta. El radar mide el tiempo entre la salida del pulso y el regreso del eco; como la radio viaja a la velocidad de la luz, 300 000 km/s, el tiempo da la distancia. La dirección hacia la que apuntaba la antena da el rumbo. El radar primario es maravillosamente independiente: el avión no necesita ningún equipo, y por eso los militares lo siguen usando. Pero tiene debilidades reales. El eco de un avión lejano es extraordinariamente débil, así que el transmisor tiene que ser enorme. El eco no dice nada sobre quién es el avión ni a qué altura vuela. Y la antena tarda varios segundos en completar una vuelta, de modo que cada avión se ve solo una vez cada 4 a 12 segundos, tiempo en el que se ha desplazado hasta 3 km.

La segunda respuesta, el **radar secundario de vigilancia** (SSR), convirtió al avión en participante. Una estación de tierra transmite una pregunta, una *interrogación*, en 1030 MHz. Una pequeña radio a bordo, el **transpondedor**, oye la pregunta y responde en 1090 MHz con una señal potente propia. Como la respuesta se transmite en lugar de reflejarse, es millones de veces más fuerte que un eco de radar, y como la genera un ordenador, puede llevar información. En la forma más antigua (Mode A) la respuesta contiene un código de identidad de cuatro cifras asignado por el controlador; en Mode C contiene además la altitud del avión. En los años 80 llegó el **Mode S** ("S" de selectivo), en el que cada transpondedor tiene una dirección única de 24 bits, puede ser interrogado individualmente y puede responder con mensajes de datos de 56 o 112 bits. Guarde en la memoria ese número, 1090 MHz, y esa expresión, Mode S: el ADS-B está construido directamente sobre ambos.

El radar secundario fue una gran mejora, pero sigue compartiendo dos limitaciones con su predecesor. El avión solo habla cuando se le pregunta, así que la tierra sigue necesitando una estación interrogadora al alcance, lo que descarta los océanos, los desiertos y las cordilleras. Y la estación sigue necesitando una antena giratoria para saber de qué dirección llegó la respuesta, de modo que cada avión sigue viéndose solo una vez por vuelta, y la pantalla del controlador sigue mostrando un punto que salta cada pocos segundos en lugar de un avión que se mueve con suavidad. Para mejorar eso hacía falta algo fundamentalmente distinto: una manera de que el avión informara de su posición sin que se le preguntara, y sin que la tierra tuviera que medir nada en absoluto.

CAPÍTULO 3**La idea: que el avión nos lo diga**

En los años 90 habían madurado dos tecnologías que hacían posible un enfoque distinto. La navegación por satélite daba a cualquier avión debidamente equipado un conocimiento preciso de su propia posición, mucho mejor que el que cualquier radar podía medir desde tierra. Y el transpondedor Mode S

ya ofrecía una radio capaz de enviar mensajes de datos en 1090 MHz. Junte las dos y la lógica es irresistible: en lugar de que la tierra se esfuerce por medir dónde está el avión, que el avión, que ya lo sabe, sencillamente lo diga, a intervalos regulares, a todo el mundo. Eso es el ADS-B, y las cuatro palabras de su nombre son una descripción precisa.

Es **automático**: nada desencadena una transmisión. El transpondedor emite según su propio calendario, unas dos veces por segundo, haya o no una estación de tierra al alcance y haga o no haga nada el piloto; de hecho, el piloto no puede detenerlo en vuelo salvo apagando el transpondedor, lo que está prohibido. Es **dependiente**: cada dato del mensaje procede del propio equipo del avión, la posición de su receptor de satélites y la altitud de su altímetro de presión, y la tierra no mide nada; confía en lo que se le dice. Es **vigilancia**: su propósito es que los demás sepan dónde está el avión, para el control del tráfico aéreo y para los aviones cercanos, a diferencia de la navegación, que es que el avión sepa dónde está él mismo, y de la comunicación, que es hablar con el piloto. Y es una **radiodifusión** (broadcast): el mensaje no tiene destinatario, ni acuse de recibo, ni cifrado, y cualquiera con un receptor al alcance oye exactamente lo mismo, sea un centro de control, otro avión de línea o una escuela.

"Dependiente" es la palabra que preocupa a los ingenieros y la que más merece explicación. El radar hace una medición independiente: si los instrumentos del avión están equivocados, al radar no le importa. El ADS-B hereda todos los errores del sistema de navegación del propio avión, y si ese sistema es engañado o falla, la posición emitida es errónea con la misma seguridad. Por eso cada mensaje ADS-B lleva, junto a la posición, una declaración de cuánto confía el avión en su propia posición (las categorías de integridad y precisión que veremos en el capítulo 5), y por eso el radar no se ha apagado.

"Radiodifusión" es la palabra que hace posible este curso. Como los mensajes se envían sin cifrar a todo el mundo, no los oye solo el control del tráfico aéreo, sino cualquier receptor sintonizado en 1090 MHz, incluido el que usted podría poner en el tejado de una escuela. La misma propiedad es la fuente de la principal limitación del sistema, tratada en el capítulo 11: un mensaje que cualquiera puede leer es también un mensaje que cualquiera puede falsificar.

CAPÍTULO 4

Cómo sabe el avión dónde está

Todo en el ADS-B descansa en que el avión conozca su propia posición, así que este capítulo trata de la navegación por satélite. El término genérico es **GNSS**, sistema global de navegación por satélite; el GPS estadounidense es el más conocido, y el Galileo europeo, el GLONASS ruso y el BeiDou chino funcionan según el mismo principio. Cada sistema es una constelación de entre 24 y 30 satélites que orbitan a unos 20 000 km de altitud, muy por encima del avión, cada uno con un reloj atómico preciso hasta unas pocas milmillonésimas de segundo. Cada satélite transmite continuamente una señal de radio que dice, en esencia: "soy el satélite número N, mi posición es tal y cual, y la hora a la que envío esto es exactamente T".

El receptor del avión oye esa señal un poco más tarde, porque la radio tarda en viajar: a 300 000 km/s, los 20 000 km desde el satélite llevan unas 67 milésimas de segundo. El receptor compara la hora marcada en el mensaje con la hora de llegada. La diferencia, multiplicada por la velocidad de la luz, es la distancia a ese satélite. Una distancia sitúa al receptor en algún punto de una esfera alrededor de ese

satélite. Dos esferas se cortan en una circunferencia; tres esferas, en dos puntos, uno de los cuales suele ser absurdo (en las profundidades de la Tierra o lejos en el espacio) y se descarta. Así que tres satélites bastarían, si el receptor tuviera un reloj perfecto.

No lo tiene. Un reloj atómico cuesta decenas de miles de euros y no cabría; el receptor tiene un reloj de cuarzo barato que puede estar desviado mucho más de lo que exige la precisión de tiempo necesaria. Aquí viene la parte elegante. El receptor trata el error de su propio reloj como una cuarta incógnita, junto a sus tres coordenadas de posición, y escucha a un cuarto satélite. Cuatro ecuaciones, cuatro incógnitas: el receptor resuelve su posición y, como subproducto, corrige su propio reloj hasta unas pocas decenas de nanosegundos. Por eso un receptor de satélites necesita al menos cuatro satélites a la vista, y por eso todo receptor GNSS es también, de paso, uno de los relojes más precisos del edificio.

Merece la pena detenerse en las magnitudes, porque explican por qué la navegación por satélite es en realidad un ejercicio de medida del tiempo, con la geometría como añadido. La luz recorre 30 centímetros en un nanosegundo y 300 metros en un microsegundo, de modo que un error de tiempo de una millonésima de segundo se convierte en un error de posición de 300 metros, y la precisión de unos pocos metros de un receptor moderno corresponde a medir el tiempo con una precisión de unos diez nanosegundos. Tomemos un caso concreto. Un satélite marca una señal con la hora 12:00:00,000 000 000; el receptor del avión la oye a las 12:00:00,070 000 000. El tiempo de viaje es 0,070 s, así que la distancia es $0,070 \times 300\,000 \text{ km/s} = 21\,000 \text{ km}$. Si el reloj del receptor hubiera adelantado un solo microsegundo, habría calculado 21 000,3 km, 300 metros de más, y el mismo error se habría colado también en la distancia a todos los demás satélites. Ese error compartido es precisamente lo que el cuarto satélite revela y elimina.

Dos altitudes, no una

Los satélites dan una altura sobre la superficie matemática de la Tierra, una altitud *geométrica*. Sin embargo, la altitud que un avión emite a efectos de tráfico aéreo no es esa. Es la **altitud barométrica**, derivada de la presión del aire fuera del avión, medida por una pequeña abertura en el fuselaje llamada toma estática. La presión del aire disminuye con la altura de manera conocida (aproximadamente 1 hPa cada 8 metros cerca del suelo, más despacio a mayor altura), y todos los altímetros del mundo convierten presión en altura usando la misma atmósfera estándar, referida a 1013,25 hPa al nivel del mar. Un día de presión inusual, la altitud barométrica de todos los aviones está equivocada en la misma cantidad, y eso es exactamente lo que se busca: lo que importa para la separación no es la altura real sobre el mar, sino que dos aviones que leen "nivel de vuelo 350" estén de verdad a 300 metros de uno que lee "nivel de vuelo 340". El ADS-B emite la altitud barométrica en sus mensajes de posición, en pasos de 25 pies (7,6 m), y emite por separado la diferencia entre esa y la altura por satélite, de modo que un receptor puede recuperar ambas.

CAPÍTULO 5

Anatomía de un mensaje

El mensaje ADS-B que usan los aviones de línea en todo el mundo es una transmisión Mode S llamada **squitter extendido**; "squitter" es antigua jerga de radar para una transmisión enviada espontáneamente y no como respuesta, y "extendido" porque, con 112 bits, dobla la longitud de la respuesta Mode S original. Los ingenieros escriben "1090ES" por "squitter extendido en 1090 MHz". Cada transmisión dura

120 microsegundos en total: un *preámbulo* de 8 microsegundos, un patrón fijo de cuatro pulsos que permite al receptor reconocer el inicio de un mensaje y sincronizar su reloj, seguido de 112 bits de datos a un bit por microsegundo.

Cómo se envía un bit: la modulación por posición de pulsos

Cada intervalo de bit, de un microsegundo, se divide en dos mitades. Un pulso de energía de radio en la primera mitad y silencio en la segunda significa 1; silencio y después un pulso significa 0. Hay por tanto exactamente un pulso por bit, sean cuales sean los datos, y el receptor solo tiene que decidir qué mitad de cada intervalo sonó más fuerte. Este esquema, la modulación por posición de pulsos, es robusto frente al tipo de ruido y desvanecimiento que sufre una señal en su camino desde un transpondedor hasta una antena lejana, y es barato de decodificar.

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

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)

Los primeros cinco bits, el formato de enlace descendente, dicen qué clase de mensaje Mode S es este; el valor 17 significa "ADS-B desde un transpondedor Mode S". La **dirección ICAO** de 24 bits es la identidad permanente del avión, asignada cuando se matricula: hay 2^{24} , es decir, 16 777 216 direcciones posibles, repartidas en bloques entre los Estados por la OACI, el organismo de aviación civil de la ONU. Los aviones belgas, por ejemplo, llevan direcciones de 448000 a 44FFFF en hexadecimal. A diferencia del código de cuatro cifras del antiguo Mode A, esta dirección nunca cambia y nunca se comparte, así que un receptor puede estar seguro de qué avión está oyendo desde el primer mensaje.

El campo **ME**, de 56 bits, es el contenido propiamente dicho, y sus primeros cinco bits, el *código de tipo*, dicen qué significa el resto. Los códigos de tipo 1 a 4 llevan el indicativo del avión, como BEL1234 o RYR7KL, en ocho caracteres de seis bits. Los códigos 9 a 18 llevan una posición en vuelo con altitud barométrica; los 20 a 22, lo mismo con altitud por satélite. El código 19 lleva la velocidad: la velocidad respecto al suelo descompuesta en componentes este-oeste y norte-sur, la velocidad vertical y la diferencia entre altitud barométrica y altitud por satélite. Los códigos 28, 29 y 31 llevan el estado: códigos de emergencia, altitud seleccionada y las categorías de integridad y precisión que indican hasta qué punto puede confiarse en la posición emitida (un "NIC" de 8, por ejemplo, promete que la posición real está a menos de 185 m de la notificada, con alta probabilidad).

Los últimos 24 bits son una **comprobación de redundancia cíclica**, un número calculado a partir de los 88 bits anteriores mediante una división polinómica fija. El receptor repite el cálculo sobre los bits que decodificó; si el resultado no coincide, al menos un bit se corrompió por el camino y el mensaje se descarta. Como un pulso de un microsegundo puede perderse fácilmente por el ruido o por un mensaje de otro avión que se solapa, esta comprobación es lo que mantiene las posiciones corruptas fuera de la pantalla del controlador. Un mensaje real, tal como lo registraría un receptor, tiene este aspecto:

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: formato de enlace descendente 17, capacidad 5. 4840D6: dirección ICAO, un avión neerlandés. 20...: código de tipo 4, un mensaje de identificación, que se decodifica como el indicativo KLM1023. 576098: la comprobación de errores.

Meter la Tierra en 34 bits

Un mensaje de posición solo tiene 17 bits para la latitud y 17 para la longitud. Son 131 072 pasos alrededor de todo el globo, unos 300 m cada uno en el ecuador: ni de lejos suficiente. El ADS-B lo resuelve con la **notificación compacta de posición** (CPR). La Tierra se divide en zonas; los 17 bits dan una posición muy precisa (hasta unos 5 m) dentro de una zona, pero no cuál es la zona. El avión alterna entre dos rejillas de zonas ligeramente distintas, mensajes "pares" e "impares", y un receptor que haya oído uno de cada puede determinar la zona sin ambigüedad. Una vez determinada, un solo mensaje basta para seguir al avión, ya que difícilmente habrá saltado a otra zona en medio segundo. Es un truco ingenioso que duplica la precisión útil sin coste alguno en bits.

Con qué frecuencia

Un transpondedor en vuelo envía un mensaje de posición dos veces por segundo, un mensaje de velocidad dos veces por segundo y su indicativo cada cinco segundos, además de mensajes de estado a intervalos más largos, es decir, unos cuatro o cinco squitters extendidos por segundo en total. Cada uno dura 120 microsegundos; el transpondedor está realmente transmitiendo ADS-B bastante menos de una milésima parte del tiempo. El resto del segundo escucha, y responde, las interrogaciones de radar en 1030 MHz y las consultas del sistema anticolidión de otros aviones.

CAPÍTULO 6 - FÍSICA

La onda: la radio como luz invisible

El mensaje sale del avión como una **onda de radio**, y la idea más útil de todo este curso es que una onda de radio y un rayo de luz son la misma cosa. Ambos son ondas electromagnéticas: un patrón de campos eléctricos y magnéticos que oscilan juntos y viajan por el espacio a la velocidad de la luz, c , que es 299 792 458 metros por segundo, o, redondeando, 300 000 km/s. Lo que distingue una onda de radio de la luz verde, de los rayos X de un hospital o de las microondas de un horno de cocina es únicamente la rapidez con que oscilan los campos: la **frecuencia**, f , medida en hercios (oscilaciones por segundo).

Como la onda viaja a una velocidad fija, la frecuencia fija la distancia entre una cresta y la siguiente, la **longitud de onda**, λ . En un segundo la onda recorre c metros y completa f oscilaciones, así que cada oscilación ocupa c / f metros:

$$c = f \times \lambda$$

Para el ADS-B: $\lambda = 300\,000\,000 / 1\,090\,000\,000 = 0,275$ m. La onda entre el avión y su antena tiene crestas separadas 27,5 cm, aproximadamente la longitud de una regla escolar.

Onda	Frecuencia	Longitud de onda	Nota
Radio FM	100 MHz	3 m	Las antenas de los coches son una fracción de esto
ADS-B / Mode S	1 090 MHz	27,5 cm	También la usan las respuestas de los transpondedores al radar
Teléfono móvil (banda 4G)	1 800 MHz	17 cm	Un vecino cercano en el espectro
Wi-Fi, horno microondas	2 450 MHz	12 cm	Misma frecuencia, potencia enormemente distinta
Luz verde visible	560 000 000 MHz	0,000 54 mm	Medio millón de veces más alta en frecuencia

Dos consecuencias importan para todo lo que sigue. Primera: como la onda es luz, viaja en línea recta a menos que algo la desvíe o la bloquee, y no atraviesa la Tierra. Eso fija el alcance del sistema, tema del capítulo 7. Segunda: como su longitud de onda es de 27,5 cm, las estructuras metálicas que interactúan con ella con más fuerza, las antenas, son de ese orden de tamaño, tema del capítulo 8.

Por qué la radio no es sonido

La confusión más común, tanto en adultos como en niños, es entre radio y sonido, probablemente porque una "radio" es una caja que produce sonido. Son fenómenos sin relación. El sonido es una onda de presión en el aire, una cadena de moléculas que empujan a sus vecinas; necesita un material por el que viajar, se mueve a 340 m/s y no puede cruzar el vacío. La radio no necesita nada: cruza el vacío entre un satélite y el avión, y se mueve casi un millón de veces más rápido. El ruido de los motores del avión y su mensaje ADS-B salen de él en el mismo instante; el mensaje llega a un receptor a 20 km en 67 microsegundos, el sonido un minuto entero después.

Por qué 1090 MHz

La frecuencia es una herencia. Los acuerdos internacionales de los años 50 reservaron la banda de 960 a 1215 MHz para la radionavegación aeronáutica, y 1090 MHz se convirtió en la frecuencia de respuesta de los transpondedores del radar secundario. Cuando se diseñó el ADS-B, reutilizar el transpondedor que ya llevaba todo avión de línea era mucho más barato que instalar una radio nueva, así que el ADS-B pasó a ser, sencillamente, otra cosa que el transpondedor Mode S dice en 1090 MHz. En Estados Unidos, los aviones pequeños que vuelan por debajo de unos 5 500 m pueden usar en su lugar un segundo sistema, el UAT en 978 MHz, y por eso los receptores de allí suelen escuchar en ambas frecuencias.

CAPÍTULO 7 - FÍSICA

Alcance: la curva de la Tierra y el debilitamiento de la señal

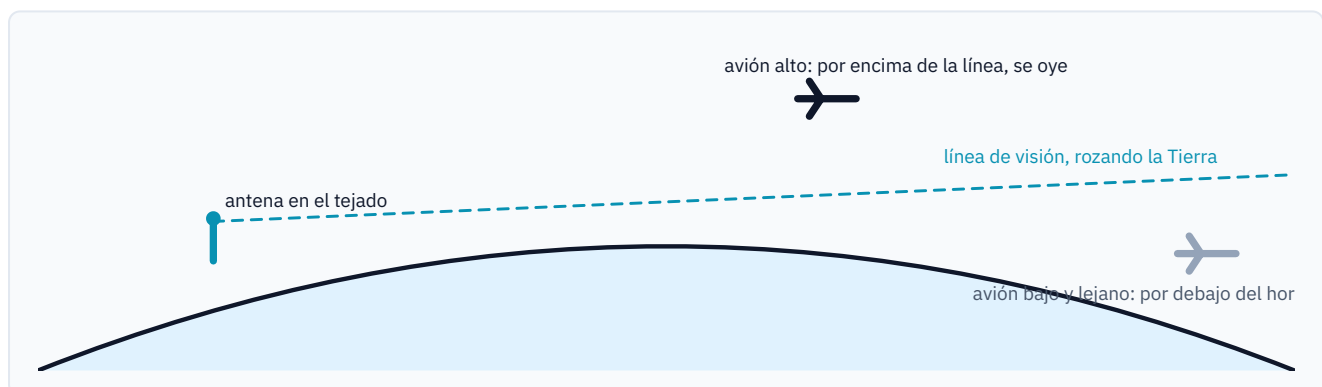
Un transpondedor transmite con una potencia de pico de unos pocos cientos de vatios. ¿A qué distancia puede oírse una señal así? La limitan dos cosas bastante distintas, y conviene mantenerlas separadas: la geometría, que impone un límite duro, y la potencia, que impone uno blando.

El horizonte radioeléctrico

A 1090 MHz, la radio se comporta como la luz: viaja en línea recta y no se curva alrededor de la Tierra. Una antena en tierra, por tanto, solo puede oír un avión mientras exista una línea recta entre ambos que no atraviese el suelo. Para un observador en la superficie, el horizonte es el lugar donde esa línea roza justo la Tierra. Cuanto más alto vuela el avión, más lejos queda ese punto de contacto; cuanto más alta la antena, más lejos todavía. La geometría de una tangente a una esfera da un resultado sencillo: la distancia al horizonte en kilómetros es aproximadamente 3,57 veces la raíz cuadrada de la altura en metros. La atmósfera curva la radio ligeramente hacia abajo, lo que alarga el horizonte alrededor de un 15 por ciento, así que los ingenieros usan 4,12 en su lugar:

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\text{sqrt}(h \text{ avión}) + \text{sqrt}(h \text{ antena})) \quad \text{alturas en metros}$$

Avión a 11 000 m, antena en un tejado de 20 m: $4,12 \times (104,9 + 4,5) = 451$ km. Avión a 1 000 m, mismo tejado: $4,12 \times (31,6 + 4,5) = 149$ km. Avión en tierra a 15 km: no se oye en absoluto, salvo que el terreno intermedio sea llano y despejado.



Esto explica la forma característica de la cobertura de un receptor: un círculo de 400 km o más para el tráfico que vuela alto, que se encoge a unas pocas decenas de kilómetros para los aviones en aproximación, y casi nada para los aviones en tierra salvo en el aeropuerto de al lado. También explica por qué la altura del receptor importa mucho más que su calidad, y por qué una colina, un edificio alto o incluso el ala del propio avión, cuando se inclina alejándose de usted, puede cortar una señal al instante.

La ley del inverso del cuadrado

Dentro del horizonte, la señal se debilita con la distancia. La antena de un transpondedor radia en todas las direcciones horizontales, así que su potencia se reparte sobre una esfera cada vez mayor. El área de una esfera crece con el cuadrado de su radio, de modo que la potencia que cae sobre una antena de tamaño fijo disminuye con el cuadrado de la distancia: al doble de distancia, un cuarto de la potencia; a diez veces la distancia, una centésima. Los ingenieros expresan esto como una *pérdida de trayecto* en

decibelios, y para 1090 MHz a 400 km resulta de unos 145 dB, lo que significa que la potencia recibida es unas 10 elevado a 14,5 veces menor que la transmitida. Un pulso de 250 vatios llega como aproximadamente una décima de milmillonésima de milivatio. Un buen receptor puede detectarlo, a duras penas, y por eso el horizonte geométrico y el límite de potencia coinciden precisamente a unos pocos cientos de kilómetros: el sistema se diseñó así.

Los dos límites interactúan de una manera que merece la pena entender. Dentro del horizonte, una señal fuerte de un avión cercano y una débil de un avión lejano se decodifican ambas perfectamente, porque el esquema de posición de pulsos del capítulo 5 solo pregunta qué mitad de cada intervalo de bit sonó más fuerte, no cuánto. La señal no va perdiendo utilidad poco a poco a medida que el avión se aleja; sigue siendo decodificable hasta que, en algún punto cerca del horizonte, o bien la geometría la corta o bien el ruido del receptor acaba por ahogarla, y la traza se detiene. Por eso los mapas de cobertura tienen bordes nítidos, y por eso los aviones más lejanos que oye un receptor son casi siempre los que vuelan más alto.

CAPÍTULO 8 - FÍSICA

Antenas: atrapar una onda de 27 centímetros

Una antena es un trozo de conductor con una forma tal que una onda electromagnética que pasa pone a los electrones de su interior a moverse al compás, produciendo una corriente alterna diminuta que un receptor puede amplificar. En el transmisor ocurre lo contrario: una corriente alterna en la antena del avión lanza la onda. La eficiencia de este intercambio depende del tamaño del conductor en relación con la longitud de onda. Un hilo recto responde con más fuerza, *resuena*, cuando mide media longitud de onda, de modo que la corriente que va y viene a lo largo de él encaja exactamente con la oscilación de la onda, como un columpio empujado a su ritmo natural. Para 1090 MHz, media longitud de onda son 13,75 cm.

La forma práctica más común es el **monopolo de cuarto de onda**: una varilla vertical de un cuarto de longitud de onda, 6,9 cm, de pie sobre una superficie conductora, el *plano de tierra*. El plano de tierra actúa como un espejo, de modo que la varilla y su reflejo se comportan juntos como una antena de media onda. Por eso la antena ADS-B de un avión es una pequeña aleta de unos centímetros de alto sobre el fuselaje, siendo el fuselaje el plano de tierra, y por eso la antena de un aficionado es un hilo corto sobre la tapa de una lata. Un hilo de longitud equivocada también funciona, pero mucho peor: la "oreja de metal" está afinada.

Tres propiedades más de la antena se desprenden de la física, y cada una tiene una consecuencia visible. La primera es la **polarización**. El campo eléctrico de una onda electromagnética oscila en una dirección definida, perpendicular a su avance, y una antena responde solo a la componente del campo a lo largo de su propia longitud. Las antenas de los aviones se montan en vertical, así que la onda ADS-B llega polarizada verticalmente, y la antena receptora también debe estar vertical; tumbada de lado apenas oye nada, igual que una onda en una cuerda agitada de arriba abajo se detiene en una ranura horizontal. La segunda es el **diagrama de radiación**. Una antena vertical es más sensible hacia el horizonte y nada en absoluto a lo largo de su propio eje, de modo que su sensibilidad en tres dimensiones tiene la forma de una rosquilla con la antena atravesando el agujero. Por eso los receptores oyen habitualmente sin dificultad aviones a 300 km y pierden durante unos segundos uno que pasa justo por encima, algo que merece la pena observar en cualquier mapa en vivo. Apilar varios elementos resonantes uno sobre otro

aplasta la rosquilla, concentrando la sensibilidad hacia el horizonte, donde están los aviones lejanos, a costa de la vertical; eso es lo que se entiende por **ganancia** de una antena, y siempre es una redistribución de la sensibilidad, nunca una creación.

La tercera tiene que ver con lo que hay entre la antena y el receptor. La antena capta no solo 1090 MHz sino todas las señales del entorno, incluidas las transmisiones de telefonía móvil a unos pocos cientos de megahercios de distancia, que son muchísimo más fuertes, así que lo primero que se coloca es un filtro que deja pasar solo la banda aeronáutica. La señal tiene que recorrer después un cable, y a 1090 MHz un cable coaxial pierde aproximadamente la mitad de la señal cada diez metros; el remedio es un amplificador de bajo ruido en la antena, antes del cable, para que la señal sea lo bastante fuerte como para sobrevivir al viaje, y no en el receptor, donde amplificar amplificaría el ruido del cable junto con lo que quede de la señal. Son detalles, pero son los detalles que deciden si un receptor en el tejado de una escuela oye los aviones en el horizonte o solo los cercanos.

CAPÍTULO 9

Recibir y decodificar

Entre la antena y un punto en un mapa hay una cadena de cinco etapas. La antena convierte la onda que pasa en una corriente alterna de unos pocos microvoltios. Un filtro y un amplificador de bajo ruido conservan la banda de 1090 MHz, rechazan todo lo demás y multiplican la señal por mil. Una radio definida por software sintoniza la frecuencia y muestrea la señal dos millones de veces por segundo, convirtiéndola en un flujo de números. Un decodificador busca en ese flujo el patrón del preámbulo, lee los 112 bits, comprueba la paridad y decodifica los campos. Y un rastreador reúne los mensajes de cada avión en un único registro actualizado continuamente: una posición, una trayectoria, una etiqueta.

La etapa notable es la tercera. Hasta alrededor de 2010, decodificar 1090 MHz exigía hardware construido a medida que costaba miles de euros. Entonces los aficionados descubrieron que un sintonizador de televisión USB de 20 euros contenía un chip al que se le podía ordenar sintonizar cualquier frecuencia y entregar la señal en bruto a un ordenador. Esta **radio definida por software** convierte el problema de radio en un problema de programación: un portátil o una Raspberry Pi recibe un flujo de dos millones de números por segundo que describen la intensidad de la señal, y un programa libre busca el patrón del preámbulo, mide qué mitad de cada intervalo de un microsegundo suena más fuerte, ensambla 112 bits, calcula el CRC e imprime los campos. El proyecto de receptor del kit de secundaria es exactamente esta cadena, y una escuela puede montarla por menos de 100 euros.

La etapa del rastreador es donde el flujo de mensajes se convierte en conocimiento. Un único mensaje de posición, recuerde, es ambiguo hasta que se han emparejado un mensaje par y uno impar. La velocidad llega por separado de la posición, el indicativo por separado de nuevo, y el rastreador los une por dirección ICAO, descarta todo lo que no supera la comprobación de errores y conserva el último estado conocido de cada avión. Si no llega ningún mensaje durante un minuto, normalmente porque el avión ha bajado por debajo del horizonte, la traza caduca.

CAPÍTULO 10

De un receptor a un mapa de un continente

Un receptor oye un círculo de cielo de unos pocos cientos de kilómetros de diámetro. Un mapa de Europa necesita cientos de ellos, y los útiles no están en las ciudades sino repartidos: en las costas, en los valles, en las islas, allí donde no llega el círculo de otro receptor. Cada receptor envía sus mensajes decodificados, cada uno marcado con la hora de llegada, a través de internet a un servicio central. Ese servicio *agrega*: el mismo mensaje de un avión alto suele llegar desde diez o veinte receptores a la vez, y los duplicados deben reconocerse y fusionarse. También comprueba: una posición que discrepa de lo que todos los receptores vecinos ven del mismo avión es probablemente un error de decodificación o un transpondedor defectuoso, y se marca o se descarta.

Multilateración: encontrar aviones que no dicen dónde están

No todos los aviones emiten una posición. Los transpondedores antiguos responden al radar con identidad y altitud pero no tienen entrada de satélite; algunos aviones, deliberadamente, no envían ninguna. Sin embargo, sus transmisiones en 1090 MHz siguen llegando a tierra, y una red puede localizarlos dándole la vuelta a la navegación por satélite. Si cuatro receptores con relojes sincronizados con precisión registran cada uno el instante en que llega la misma transmisión, las diferencias entre esos instantes revelan las diferencias de distancia: 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. Todos los puntos con esa propiedad están sobre una superficie curva, un hiperboloide, entre A y B. Tres superficies así, de cuatro receptores, se cortan en el avión. Esto es la **multilateración**, y exige una precisión de tiempo de una décima de microsegundo, 30 m, entre receptores separados por cientos de kilómetros, precisión que los receptores obtienen de los mismos satélites que usa el avión.

La misma idea, dos veces

Navegación por satélite: un receptor, cuatro transmisores de posición conocida, se resuelve la posición del receptor. Multilateración: un transmisor, cuatro receptores de posición conocida, se resuelve la posición del transmisor. En ambos casos lo que realmente se mide es el tiempo, y 1 microsegundo son 300 metros.

CAPÍTULO 11

Para qué se usa y dónde se queda corto

El control del tráfico aéreo es el primer cliente. En toda Europa, los controladores ven ahora una imagen fusionada en la que el ADS-B, con sus actualizaciones dos veces por segundo y su precisión de nivel satelital, se combina con el radar y la multilateración; donde el radar nunca llegó, sobre el Atlántico Norte, el Ártico, el Sáhara y la mayoría de los océanos, los mensajes ADS-B los captan receptores a bordo de satélites de comunicaciones de órbita baja, lo que ha permitido espaciar los aviones que cruzan el Atlántico mucho más cerca unos de otros que antes. Los aviones son el segundo cliente: un avión de línea con "ADS-B In" muestra el tráfico cercano a su tripulación y lo alimenta al sistema anticolidión. Los aeropuertos lo usan para seguir aviones y vehículos en tierra con niebla. Los investigadores usan los datos abiertos para estudiar el ruido, el consumo de combustible, las estelas de condensación y los retrasos. Y un receptor en el tejado de una escuela es, a pequeña escala, un participante en todo esto.

Las debilidades del sistema se derivan directamente de su diseño, y cada una merece entenderse más que simplemente enumerarse. Como los mensajes se emiten sin cifrar, ni cifrados ni firmados, nada en el propio mensaje demuestra que procede de un avión. Un transmisor en tierra podría, ilegalmente, emitir un mensaje perfectamente formado que describiera un avión que no existe, y un receptor lo decodificaría sin rechistar. Lo que protege al sistema no es el mensaje sino el contexto que lo rodea: un fantasma no aparecerá en el radar, no lo encontrará la multilateración y no se comportará como el tráfico real, y los centros de control hacen comprobaciones cruzadas continuamente. Durante muchos años se ha debatido una versión del protocolo con firmas criptográficas; el obstáculo es menos técnico que práctico, ya que tendrían que cambiar todos los transpondedores del mundo.

Como la posición depende del receptor de satélites del avión, todo lo que perturba la navegación por satélite perturba el ADS-B. Las interferencias y la suplantación de señales de satélite se han vuelto frecuentes cerca de las zonas de conflicto, y un avión que atraviesa una de esas zonas puede ser incapaz de calcular una posición, o calcular una errónea. Sus mensajes llevan entonces una categoría de integridad degradada, el sistema del controlador los marca, y el radar, la medición independiente que el ADS-B nunca pretendió sustituir por completo, toma el relevo. La relación entre ambos no es, por tanto, la de sucesor y predecesor, sino la de socios con debilidades complementarias.

Como la obligación cubre los aviones de línea y la mayoría de las aeronaves grandes, pero no todo lo que vuela, el mapa es incompleto por diseño. Las avionetas fuera del espacio aéreo controlado, los planeadores, los globos y muchas aeronaves militares pueden no llevar ADS-B en absoluto, y algunas avionetas usan otros sistemas que un receptor de 1090 MHz no oye. Y como la emisión identifica al avión, puede identificar a su propietario: seguir a un jet privado concreto es, en la práctica, seguir a una persona concreta, lo que ha dado lugar a programas que enmascaran la matrícula de las aeronaves cuyos propietarios lo solicitan, y a un debate que continúa sobre si una información que un avión emite al mundo puede ser al mismo tiempo privada. Es un buen debate para plantear a los estudiantes mayores, porque la física no le da respuesta.

CAPÍTULO 12

Una breve historia

1935 a 1945

Se desarrolla el radar primario en Gran Bretaña, Alemania y Estados Unidos; al final de la guerra, los transpondedores de "identificación amigo-enemigo" responden a los pulsos de radar con una respuesta codificada, el antepasado del radar secundario.

Años 50 a 60

Se estandariza el radar secundario civil: interrogaciones en 1030 MHz, respuestas en 1090 MHz, códigos de identidad Mode A y altitud Mode C.

Años 80

El Mode S, con direcciones únicas de 24 bits y mensajes de datos, se desarrolla en el Lincoln Laboratory del MIT y lo adopta la OACI. El GPS entra en servicio para los usuarios civiles.

Años 90 a 2000

Se define y se prueba el ADS-B, sobre todo en Alaska, donde la cobertura radar era imposible y los accidentes frecuentes. El squitter extendido en 1090 MHz se estandariza internacionalmente.

Años 2010

Las radios definidas por software baratas convierten la recepción en una afición; aparecen redes de voluntarios con miles de receptores. Se lanzan receptores a bordo de satélites para la cobertura oceánica.

2020

El ADS-B pasa a ser obligatorio para la mayoría de las aeronaves en el espacio aéreo controlado de Estados Unidos (enero) y de la Unión Europea (junio, con una transición hasta final de año). El cielo empieza a hablar, en todas partes, todo el tiempo.

Glosario

ADS-B

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, vigilancia dependiente automática por radiodifusión. Los aviones emiten su propia posición.

Altitud barométrica

Altura derivada de la presión del aire, usando una atmósfera estándar; la que notifican los aviones.

CPR

Notificación compacta de posición, el esquema par/impar que mete una posición precisa en 34 bits.

CRC

Comprobación de redundancia cíclica, la comprobación de errores de 24 bits que cierra cada mensaje.

Squitter extendido

La transmisión Mode S espontánea de 112 bits que transporta el ADS-B.

GNSS

Sistema global de navegación por satélite: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou.

Dirección ICAO

La identidad permanente de 24 bits del transpondedor de un avión.

Mode S

El estándar de radar secundario selectivo sobre el que se construye el ADS-B.

Multilateración

Localizar un transmisor a partir de las diferencias de tiempo de llegada de la señal a varios receptores.

Pérdida de trayecto

El debilitamiento de una señal con la distancia, según la ley del inverso del cuadrado.

Horizonte radioeléctrico

La distancia máxima a la que una línea recta entre la antena y el avión no toca la Tierra.

SDR

Radio definida por software: un sintonizador que entrega muestras de la señal en bruto a un ordenador para decodificarlas.

SSR

Radar secundario de vigilancia: la tierra interroga, el transpondedor responde.

Transpondedor

La radio del avión que responde al radar y transmite ADS-B en 1090 MHz.

Longitud de onda

Distancia entre crestas sucesivas de una onda: c / f , 27,5 cm a 1090 MHz.

A CONTINUACIÓN

De la teoría a la práctica: construya el receptor

Doce capítulos han explicado un sistema que ahora puede tener en la mano. El taller práctico los convierte en el trabajo de una tarde: qué comprar por 100 a 150 euros, cómo construir y colocar la antena, cómo preparar una Raspberry Pi e instalar el feeder de Dataero, y cómo ver aparecer en el mapa

en vivo los aviones que oye, acreditados a su estación. Cada capítulo de arriba tiene allí una medición esperándole: el horizonte radioeléctrico contra aviones reales, la ley del inverso del cuadrado en la columna de señal, el ritmo diario del cielo.

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