

CURSO DE REFERÊNCIA - PARA QUALQUER ADULTO

O que é o ADS-B e como ele funciona

Doze capítulos. Não se pressupõe nenhum conhecimento prévio de aviação ou de rádio; a matemática do ensino médio basta para os exemplos resolvidos, e eles podem ser pulados sem perder o fio da meada. Tempo de leitura: cerca de 50 minutos.

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

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 O problema: um céu cheio de aviões que ninguém consegue ver

CAPÍTULO 2 Antes do ADS-B: encontrando aeronaves com radar

CAPÍTULO 3 A ideia: deixar que a aeronave nos conte

CAPÍTULO 4 Como a aeronave sabe onde está

CAPÍTULO 5 Anatomia de uma mensagem

CAPÍTULO 6 - FÍSICA A onda: o rádio como luz invisível

CAPÍTULO 7 - FÍSICA Alcance: a curva da Terra e o enfraquecimento do sinal

CAPÍTULO 8 - FÍSICA Antenas: capturando uma onda de 27 centímetros

CAPÍTULO 9 Recepção e decodificação

CAPÍTULO 10 De um receptor a um mapa de um continente

CAPÍTULO 11 Para que serve, e onde fica aquém

CAPÍTULO 12 Uma breve história

Glossário

A SEGUIR Da teoria à prática: monte o receptor

CAPÍTULO 1

O problema: um céu cheio de aviões que ninguém consegue ver

Em um dia útil comum, cerca de 30.000 voos cruzam o espaço aéreo europeu. Um avião de passageiros em cruzeiro se desloca a aproximadamente 250 metros por segundo, ou 900 km/h; duas aeronaves voando uma em direção à outra se aproximam meio quilômetro a cada segundo. Um piloto olhando pela janela quase não vê nada disso: a 10.000 metros, as outras aeronaves são pontinhos, e as nuvens escondem a maioria delas de qualquer modo. O céu é uma malha viária tridimensional sem nenhuma estrada pintada, e o tráfego que circula nela é, ao mesmo tempo, rápido e invisível.

O controle de tráfego aéreo existe para manter esse tráfego separado. As regras são simples em princípio: no espaço aéreo controlado, as aeronaves são mantidas a pelo menos 1.000 pés (cerca de 300 metros) de distância na vertical, ou a uma distância horizontal definida, tipicamente 5 milhas náuticas (9,3 km) perto da cobertura de radar e muito mais sobre os oceanos. Para aplicar as regras, um controlador precisa saber, de forma contínua e confiável, a posição de cada aeronave no setor: não onde ela estava um minuto atrás, mas onde ela está agora, a que altura e para onde está indo. Todo o assunto deste curso é como esse conhecimento é obtido. A palavra técnica para isso é **vigilância**.

Um número para guardar

A 900 km/h, uma aeronave percorre 15 km em um minuto e 250 m em um segundo. Qualquer método de vigilância que se atualize devagar, ou com um erro grande, deixa o controlador adivinhando justamente nas distâncias que importam.

CAPÍTULO 2**Antes do ADS-B: encontrando aeronaves com radar**

A primeira resposta, desenvolvida no fim dos anos 1930 e amadurecida durante a Segunda Guerra Mundial, foi o **radar primário**. Uma grande antena giratória emite um pulso curto e muito potente de energia de rádio. Quando o pulso atinge uma aeronave, uma fração minúscula dele é refletida de volta. O radar mede o tempo entre a saída do pulso e o retorno do eco; como o rádio viaja à velocidade da luz, 300.000 km/s, o tempo dá a distância. A direção para a qual a antena apontava dá o rumo. O radar primário é maravilhosamente independente: a aeronave não precisa de equipamento nenhum, e é por isso que os militares ainda o usam. Mas ele tem fraquezas reais. O eco de uma aeronave distante é extraordinariamente fraco, de modo que o transmissor precisa ser enorme. O eco não diz nada sobre quem é a aeronave nem a que altura ela está. E a antena leva vários segundos para completar uma rotação, de modo que cada aeronave é vista apenas uma vez a cada 4 a 12 segundos, intervalo em que ela já se moveu até 3 km.

A segunda resposta, o **radar secundário de vigilância** (SSR), transformou a aeronave em participante. Uma estação de solo transmite uma pergunta, uma *interrogação*, em 1030 MHz. Um pequeno rádio a bordo, o **transponder**, ouve a pergunta e responde em 1090 MHz com um sinal forte próprio. Como a resposta é transmitida, e não refletida, ela é milhões de vezes mais forte do que um eco de radar, e como é gerada por um computador, pode carregar informação. Na forma mais antiga (Mode A), a resposta contém um código de identidade de quatro dígitos atribuído pelo controlador; no Mode C, contém também a altitude da aeronave. Nos anos 1980 veio o **Mode S** ("S" de seletivo), em que cada transponder tem um endereço único de 24 bits, pode ser interrogado individualmente e pode responder com mensagens de dados de 56 ou 112 bits. Guarde esse número, 1090 MHz, e essa expressão, Mode S: o ADS-B é construído diretamente sobre os dois.

O radar secundário foi um grande avanço, mas ainda compartilha duas limitações com seu antecessor. A aeronave só fala quando perguntada, de modo que o solo ainda precisa de uma estação interrogadora ao alcance, o que exclui oceanos, desertos e cadeias de montanhas. E a estação ainda precisa de uma antena giratória para saber de que direção veio a resposta, de modo que cada aeronave continua sendo vista apenas uma vez por rotação, e a tela do controlador continua mostrando um ponto que salta a cada poucos segundos, em vez de uma aeronave se movendo suavemente. Para melhorar isso, era preciso algo fundamentalmente diferente: um jeito de a aeronave informar a própria posição sem ser perguntada, e sem que o solo precisasse medir coisa alguma.

CAPÍTULO 3

A ideia: deixar que a aeronave nos conte

Nos anos 1990, duas tecnologias haviam amadurecido o bastante para tornar possível uma abordagem diferente. A navegação por satélite dava a toda aeronave devidamente equipada um conhecimento preciso da própria posição, muito melhor do que qualquer radar conseguiria medir do solo. E o transponder Mode S já fornecia um rádio capaz de enviar mensagens de dados em 1090 MHz. Junte as duas e a lógica é irresistível: em vez de o solo penar para medir onde a aeronave está, deixe que a aeronave, que já sabe, simplesmente diga, a intervalos regulares, para todo mundo. Isso é o ADS-B, e as quatro palavras do seu nome são uma descrição precisa.

Ele é **automático**: nada dispara uma transmissão. O transponder envia segundo o seu próprio cronograma, cerca de duas vezes por segundo, haja ou não uma estação de solo ao alcance e faça o piloto o que fizer; na verdade, o piloto não pode interrompê-lo em voo, a não ser desligando o transponder, o que é proibido. Ele é **dependente**: cada item da mensagem vem do equipamento da própria aeronave, a posição do seu receptor de satélite e a altitude do seu altímetro de pressão, e o solo não mede nada; ele confia no que lhe é dito. Ele é **vigilância**: seu propósito é deixar que os outros saibam onde a aeronave está, para o controle de tráfego aéreo e para as aeronaves próximas, diferentemente da navegação, que é a aeronave saber onde ela mesma está, e da comunicação, que é falar com o piloto. E ele é uma **difusão** (broadcast): a mensagem não tem destinatário, nem confirmação de recebimento, nem criptografia, e qualquer um com um receptor ao alcance ouve exatamente a mesma coisa, seja um centro de controle, outro avião de passageiros ou uma escola.

"Dependente" é a palavra que preocupa os engenheiros e a que mais merece explicação. O radar faz uma medição independente: se os instrumentos da aeronave estiverem errados, o radar não se importa. O ADS-B herda cada erro do sistema de navegação da própria aeronave, e se esse sistema for enganado ou falhar, a posição transmitida estará errada com a mesma confiança. É por isso que cada mensagem ADS-B carrega, ao lado da posição, uma declaração de quanto a aeronave confia na própria posição (as categorias de integridade e precisão que veremos no capítulo 5), e é por isso que o radar não foi desligado.

"Difusão" é a palavra que torna este curso possível. Como as mensagens são enviadas às claras para todo mundo, elas são ouvidas não só pelo controle de tráfego aéreo, mas por qualquer receptor sintonizado em 1090 MHz, inclusive aquele que você talvez coloque no telhado de uma escola. A mesma propriedade é a origem da principal limitação do sistema, discutida no capítulo 11: uma mensagem que qualquer um pode ler é também uma mensagem que qualquer um pode forjar.

CAPÍTULO 4

Como a aeronave sabe onde está

Tudo no ADS-B se apoia no fato de a aeronave conhecer a própria posição, de modo que este capítulo trata da navegação por satélite. O termo genérico é **GNSS**, Global Navigation Satellite System (sistema global de navegação por satélite); o GPS americano é o mais conhecido, e o Galileo europeu, o GLONASS russo e o BeiDou chinês funcionam pelo mesmo princípio. Cada sistema é uma constelação de cerca de 24 a 30 satélites orbitando a aproximadamente 20.000 km de altitude, muito acima da aeronave, cada

um levando um relógio atômico preciso a alguns bilionésimos de segundo. Cada satélite transmite continuamente um sinal de rádio que diz, em essência: "este é o satélite número N, minha posição é tal e tal, e a hora em que enviei isto é exatamente T".

O receptor na aeronave ouve esse sinal um pouco depois, porque o rádio leva tempo para viajar: a 300.000 km/s, os 20.000 km desde o satélite levam cerca de 67 milésimos de segundo. O receptor compara a hora marcada na mensagem com a hora de chegada. A diferença, multiplicada pela velocidade da luz, é a distância até aquele satélite. Uma distância coloca o receptor em algum lugar de uma esfera ao redor daquele satélite. Duas esferas se cruzam em um círculo; três esferas, em dois pontos, um dos quais costuma ser absurdo (bem fundo no subsolo ou longe no espaço) e é descartado. Então três satélites bastariam, se o receptor tivesse um relógio perfeito.

Ele não tem. Um relógio atômico custa dezenas de milhares de euros e não caberia; o receptor tem um relógio de quartzo barato, que pode estar errado por muito mais do que a precisão de tempo necessária. Aqui está a parte elegante. O receptor trata o erro do próprio relógio como uma quarta incógnita, ao lado das três coordenadas da sua posição, e escuta um quarto satélite. Quatro equações, quatro incógnitas: o receptor resolve a própria posição e, como subproduto, corrige o próprio relógio a algumas dezenas de nanossegundos. É por isso que um receptor de satélite precisa de pelo menos quatro satélites à vista, e é por isso que todo receptor GNSS é também, de quebra, um dos relógios mais precisos do prédio.

Vale a pena se demorar nas ordens de grandeza, porque elas explicam por que a navegação por satélite é, na verdade, um exercício de medição de tempo em que a geometria vem em segundo plano. A luz percorre 30 centímetros em um nanossegundo e 300 metros em um microssegundo, de modo que um erro de tempo de um milionésimo de segundo se torna um erro de posição de 300 metros, e a precisão de alguns metros de um receptor moderno corresponde a uma medição de tempo da ordem de dez nanossegundos. Tome um caso concreto. Um satélite marca um sinal com a hora 12:00:00,000 000 000; o receptor da aeronave o ouve às 12:00:00,070 000 000. O tempo de viagem é de 0,070 s, então a distância é $0,070 \times 300.000 \text{ km/s} = 21.000 \text{ km}$. Se o relógio do receptor estivesse adiantado em um único microssegundo, ele teria calculado 21.000,3 km, 300 metros a mais, e o mesmo erro teria se infiltrado também na distância de todos os outros satélites. Esse erro compartilhado é exatamente o que o quarto satélite expõe e elimina.

Duas altitudes, não uma

Os satélites fornecem uma altura acima da superfície matemática da Terra, uma altitude *geométrica*. No entanto, a altitude que uma aeronave transmite para fins de controle de tráfego aéreo não é essa. É a **altitude barométrica**, derivada da pressão do ar do lado de fora da aeronave, medida por uma pequena abertura na fuselagem chamada tomada estática. A pressão do ar cai com a altura de um modo conhecido (aproximadamente 1 hPa a cada 8 metros perto do solo, mais lentamente lá em cima), e todo altímetro do mundo converte pressão em altura usando a mesma atmosfera padrão, referenciada a 1013,25 hPa ao nível do mar. Em um dia de pressão incomum, a altitude barométrica de todas as aeronaves está errada pela mesma quantidade, e esse é exatamente o ponto: o que importa para a separação não é a altura verdadeira acima do mar, mas que duas aeronaves que leem "nível de voo 350" estejam de fato 300 metros acima de uma que lê "nível de voo 340". O ADS-B transmite a altitude barométrica nas suas mensagens de posição, em passos de 25 pés (7,6 m), e transmite separadamente a diferença entre ela e a altura por satélite, de modo que um receptor possa recuperar as duas.

CAPÍTULO 5

Anatomia de uma mensagem

A mensagem ADS-B usada pelos aviões de passageiros no mundo todo é uma transmissão Mode S chamada **squitter estendido**; "squitter" é um antigo jargão de radar para uma transmissão enviada espontaneamente, e não em resposta, e "estendido" porque, com 112 bits, ela tem o dobro do comprimento da resposta Mode S original. Os engenheiros escrevem "1090ES" para "squitter estendido em 1090 MHz". Cada transmissão dura 120 microssegundos no total: um *preâmbulo* de 8 microssegundos, um padrão fixo de quatro pulsos que permite ao receptor reconhecer o início de uma mensagem e sincronizar o seu relógio, seguido de 112 bits de dados a um bit por microssegundo.

Como um bit é enviado: modulação por posição de pulso

Cada intervalo de bit, de um microssegundo, é dividido em duas metades. Um pulso de energia de rádio na primeira metade e silêncio na segunda significa 1; silêncio e depois um pulso significa 0. Há, portanto, exatamente um pulso por bit, sejam quais forem os dados, e o receptor só precisa decidir qual metade de cada intervalo foi mais forte. Esse esquema, a modulação por posição de pulso, é robusto contra os tipos de ruído e desvanecimento que um sinal sofre no caminho entre um transponder e uma antena distante, e é barato de decodificar.

Quatro bits em modulação por posição de pulso: 1, 0, 1, 1



Cada intervalo dura 1 microssegundo. Pulso na primeira metade: 1. Pulso na segunda metade: 0.

Os 112 bits

DF	CA	endereço ICAO	ME - a carga útil	PI
5 bits	3 bits	24 bits	56 bits	24 bits
formato de downlink	capacidade	identidade única da aeronave	posição, altitude, velocidade, indicativo de chamada ou status, conforme o código de tipo nos seus primeiros 5 bits	verificação de erros (CRC)

Os cinco primeiros bits, o formato de downlink, dizem que tipo de mensagem Mode S é esta; o valor 17 significa "ADS-B vindo de um transponder Mode S". O **endereço ICAO** de 24 bits é a identidade permanente da aeronave, atribuída quando ela é registrada: há 2^{24} , ou 16.777.216, endereços possíveis, alocados em blocos aos Estados pela ICAO, o órgão de aviação civil da ONU. As aeronaves belgas, por exemplo, levam endereços de 448000 a 44FFFF em hexadecimal. Ao contrário do código de quatro dígitos do antigo Mode A, esse endereço nunca muda e nunca é compartilhado, de modo que um receptor pode ter certeza de qual aeronave está ouvindo desde a primeiríssima mensagem.

O campo **ME**, de 56 bits, é o conteúdo propriamente dito, e os seus cinco primeiros bits, o *código de tipo*, dizem o que o restante significa. Os códigos de tipo 1 a 4 carregam o indicativo de chamada da aeronave, como BEL1234 ou RYR7KL, em oito caracteres de seis bits. Os códigos 9 a 18 carregam uma posição em voo com altitude barométrica; 20 a 22, o mesmo com altitude por satélite. O código 19 carrega a velocidade: a velocidade em relação ao solo decomposta nas componentes leste-oeste e norte-sul, a razão vertical e a diferença entre a altitude barométrica e a altitude por satélite. Os códigos 28, 29 e 31 carregam status: códigos de emergência, altitude selecionada e as categorias de integridade e precisão que dizem até que ponto a posição transmitida pode ser confiável (um "NIC" de 8, por exemplo, promete que a posição verdadeira está a menos de 185 m da informada, com alta probabilidade).

Os últimos 24 bits são uma **verificação de redundância cíclica**, um número calculado a partir dos 88 bits anteriores por uma divisão polinomial fixa. O receptor repete o cálculo sobre os bits que decodificou; se o resultado não bater, pelo menos um bit foi corrompido no caminho e a mensagem é descartada. Como um pulso de um microssegundo pode facilmente se perder no ruído ou numa mensagem sobreposta de outra aeronave, essa verificação é o que mantém posições truncadas fora da tela do controlador. Uma mensagem real, tal como um receptor a registraria, tem esta aparência:

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: formato de downlink 17, capacidade 5. 4840D6: endereço ICAO, uma aeronave holandesa. 20...: código de tipo 4, uma mensagem de identificação, que decodifica para o indicativo de chamada KLM1023. 576098: a verificação de erros.

Cabendo a Terra em 34 bits

Uma mensagem de posição tem apenas 17 bits para a latitude e 17 para a longitude. São 131.072 passos ao redor do globo inteiro, cerca de 300 m cada no equador: nem de longe bom o bastante. O ADS-B resolve isso com o **relato compacto de posição** (CPR). A Terra é dividida em zonas; os 17 bits dão uma posição muito precisa (a cerca de 5 m) dentro de uma zona, mas não qual é a zona. A aeronave alterna entre duas grades de zonas ligeiramente diferentes, mensagens "pares" e "ímpares", e um receptor que tenha ouvido uma de cada consegue determinar a zona sem ambiguidade. Depois disso, uma única mensagem basta para seguir a aeronave, já que ela dificilmente terá saltado para outra zona em meio segundo. É um truque engenhoso que dobra a precisão útil sem custar nenhum bit.

Com que frequência

Um transponder em voo envia uma mensagem de posição duas vezes por segundo, uma mensagem de velocidade duas vezes por segundo e o seu indicativo de chamada a cada cinco segundos, além de mensagens de status a intervalos mais longos, totalizando cerca de quatro a cinco squitters estendidos por segundo. Cada um dura 120 microssegundos; o transponder está de fato transmitindo ADS-B durante bem menos de um milésimo do tempo. No resto do segundo, ele está escutando, e respondendo, as interrogações de radar em 1030 MHz e as consultas do sistema anticollisão de outras aeronaves.

CAPÍTULO 6 - FÍSICA

A onda: o rádio como luz invisível

A mensagem deixa a aeronave como uma **onda de rádio**, e a ideia mais útil de todo este curso é que uma onda de rádio e um raio de luz são a mesma coisa. Ambos são ondas eletromagnéticas: um padrão de campos elétrico e magnético que oscilam juntos e viajam pelo espaço à velocidade da luz, c , que é 299.792.458 metros por segundo, ou, com boa aproximação, 300.000 km/s. O que distingue uma onda de rádio da luz verde, dos raios X de um hospital ou das micro-ondas de um forno de cozinha é apenas a rapidez com que os campos oscilam: a **frequência**, f , medida em hertz (oscilações por segundo).

Como a onda viaja a uma velocidade fixa, a frequência fixa a distância entre uma crista e a seguinte, o **comprimento de onda**, λ . Em um segundo, a onda percorre c metros e completa f oscilações, de modo que cada oscilação ocupa c / f metros:

$$c = f \times \lambda$$

Para o ADS-B: $\lambda = 300.000.000 / 1.090.000.000 = 0,275$ m. A onda entre a aeronave e a sua antena tem cristas separadas por 27,5 cm, mais ou menos o comprimento de uma régua escolar.

Onda	Frequência	Comprimento de onda	Observação
Rádio FM	100 MHz	3 m	As antenas de carro são uma fração disso
ADS-B / Mode S	1.090 MHz	27,5 cm	Também usada pelas respostas de transponder ao radar
Celular (banda 4G)	1.800 MHz	17 cm	Uma vizinha próxima no espectro
Wi-Fi, forno de micro-ondas	2.450 MHz	12 cm	Mesma frequência, potência imensamente diferente
Luz verde visível	560.000.000 MHz	0,00054 mm	Meio milhão de vezes mais alta em frequência

Duas consequências importam para tudo o que vem a seguir. Primeiro, como a onda é luz, ela viaja em linha reta a menos que algo a desvie ou bloqueie, e ela não atravessa a Terra. Isso define o alcance do sistema, assunto do capítulo 7. Segundo, como o seu comprimento de onda é de 27,5 cm, as estruturas metálicas que interagem com ela mais fortemente, as antenas, têm tamanho dessa ordem, assunto do capítulo 8.

Por que rádio não é som

A confusão mais comum, tanto em adultos quanto em crianças, é entre rádio e som, provavelmente porque um "rádio" é uma caixa que produz som. São fenômenos sem relação. O som é uma onda de pressão no ar, uma cadeia de moléculas empurrando as vizinhas; ele precisa de um material para se propagar, move-se a 340 m/s e não consegue atravessar o vácuo. O rádio não precisa de nada: ele atravessa o vácuo entre um satélite e a aeronave, e se move quase um milhão de vezes mais rápido. O ruído dos motores da aeronave e a sua mensagem ADS-B saem dela no mesmo instante; a mensagem chega a um receptor a 20 km de distância em 67 microssegundos, o som, um minuto inteiro depois.

Por que 1090 MHz

A frequência é uma herança. Acordos internacionais dos anos 1950 reservaram a faixa de 960 a 1215 MHz para a radionavegação aeronáutica, e 1090 MHz se tornou a frequência de resposta dos transponders do radar secundário. Quando o ADS-B foi projetado, reutilizar o transponder já instalado em todo avião de passageiros era muito mais barato do que instalar um rádio novo, de modo que o ADS-B simplesmente se tornou mais uma coisa que o transponder Mode S diz em 1090 MHz. Nos Estados Unidos, aeronaves menores voando abaixo de cerca de 5.500 m podem usar um segundo sistema no lugar, o UAT em 978 MHz, e é por isso que os receptores de lá costumam escutar nas duas frequências.

CAPÍTULO 7 - FÍSICA

Alcance: a curva da Terra e o enfraquecimento do sinal

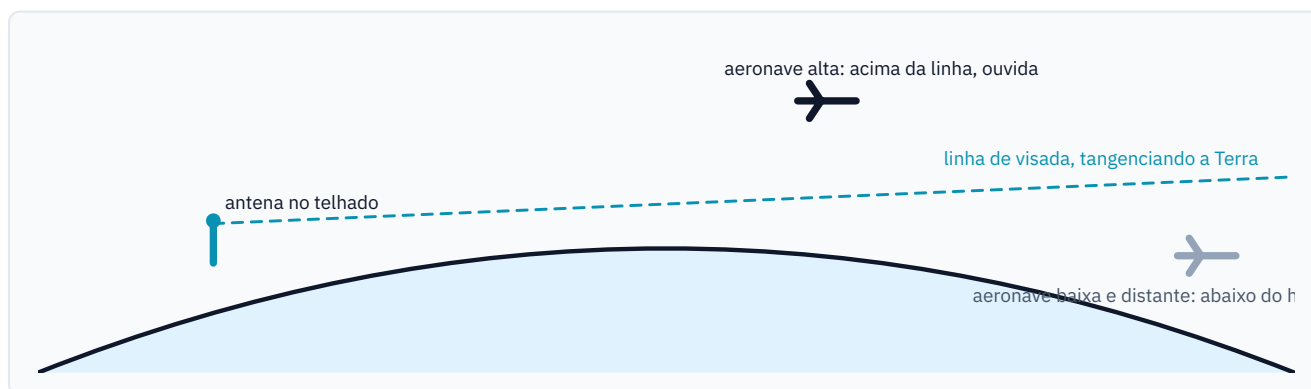
Um transponder transmite com uma potência de pico de algumas centenas de watts. A que distância um sinal desses pode ser ouvido? Duas coisas bem diferentes o limitam, e vale a pena mantê-las separadas: a geometria, que impõe um limite rígido, e a potência, que impõe um limite suave.

O horizonte de rádio

Em 1090 MHz, o rádio se comporta como luz: viaja em linha reta e não se curva ao redor da Terra. Uma antena no solo só consegue, portanto, ouvir uma aeronave enquanto existir uma linha reta entre as duas que não passe pelo chão. Para um observador na superfície, o horizonte é onde essa linha apenas tangencia a Terra. Quanto mais alta a aeronave, mais distante fica esse ponto de tangência; quanto mais alta a antena, mais distante ainda. A geometria de uma tangente a uma esfera dá um resultado simples: a distância até o horizonte, em quilômetros, é cerca de 3,57 vezes a raiz quadrada da altura em metros. A atmosfera curva o rádio ligeiramente para baixo, o que estica o horizonte em cerca de 15 por cento, de modo que os engenheiros usam 4,12 no lugar:

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

Aeronave a 11.000 m, antena em um telhado de 20 m: $4,12 \times (104,9 + 4,5) = 451 \text{ km}$. Aeronave a 1.000 m, mesmo telhado: $4,12 \times (31,6 + 4,5) = 149 \text{ km}$. Aeronave no solo a 15 km: não é ouvida de jeito nenhum, a menos que o terreno entre as duas seja plano e desimpedido.



Isso explica a forma característica da cobertura de um receptor: um círculo de 400 km ou mais para o tráfego em grande altitude, encolhendo para algumas dezenas de quilômetros para aeronaves em aproximação, e quase nada para aeronaves no solo, exceto no aeroporto ao lado. Explica também por

que a altura do receptor importa muito mais do que a qualidade do receptor, e por que um morro, um prédio alto ou até a própria asa da aeronave, quando ela inclina para longe de você, pode cortar um sinal instantaneamente.

A lei do inverso do quadrado

Dentro do horizonte, o sinal enfraquece com a distância. A antena de um transponder irradia em todas as direções horizontais, de modo que a sua potência se espalha por uma esfera cada vez maior. A área de uma esfera cresce com o quadrado do seu raio, então a potência que cai sobre uma antena de tamanho fixo diminui com o quadrado da distância: duas vezes mais longe, um quarto da potência; dez vezes mais longe, um centésimo. Os engenheiros expressam isso como uma *perda de percurso* em decibéis, e para 1090 MHz ao longo de 400 km ela chega a cerca de 145 dB, o que significa que a potência recebida é cerca de 10 elevado a 14,5 vezes menor do que a potência transmitida. Um pulso de 250 watts chega como aproximadamente um décimo de bilionésimo de miliwatt. Um bom receptor consegue detectar isso, por pouco, e é por isso que o horizonte geométrico e o limite de potência coincidem a algumas centenas de quilômetros: o sistema foi projetado assim.

Os dois limites interagem de um modo que vale a pena entender. Dentro do horizonte, um sinal forte de uma aeronave próxima e um fraco de uma aeronave distante são ambos decodificados perfeitamente, porque o esquema de posição de pulso do capítulo 5 só pergunta qual metade de cada intervalo de bit foi mais forte, não quão forte. O sinal não vai perdendo a utilidade gradualmente à medida que a aeronave se afasta; ele continua decodificável até que, em algum ponto perto do horizonte, ou a geometria o corta ou o ruído do receptor finalmente o afoga, e a trajetória para. É por isso que os mapas de cobertura têm bordas nítidas, e por isso que as aeronaves mais distantes que um receptor ouve são quase sempre as mais altas.

CAPÍTULO 8 - FÍSICA

Antenas: capturando uma onda de 27 centímetros

Uma antena é um pedaço de condutor moldado de forma que uma onda eletromagnética que passa coloque os elétrons dele em movimento sincronizado, produzindo uma minúscula corrente alternada que um receptor pode amplificar. O inverso acontece no transmissor: uma corrente alternada na antena da aeronave lança a onda. A eficiência dessa troca depende do tamanho do condutor em relação ao comprimento de onda. Um fio reto responde com mais força, ele *ressoa*, quando tem meio comprimento de onda, de modo que a corrente que vai e volta ao longo dele se encaixa exatamente na oscilação da onda, como um balanço de criança empurrado no seu ritmo natural. Para 1090 MHz, meio comprimento de onda são 13,75 cm.

A forma prática mais comum é o **monopolo de um quarto de onda**: uma haste vertical de um quarto do comprimento de onda, 6,9 cm, apoiada sobre uma superfície condutora, o *plano de terra*. O plano de terra atua como um espelho, de modo que a haste e o seu reflexo juntos se comportam como uma antena de meia onda. É por isso que a antena ADS-B de uma aeronave é uma lâmina atarracada de alguns centímetros de altura na fuselagem, sendo a fuselagem o plano de terra, e por isso que a antena de um hobbista é um fio curto sobre uma tampa de lata. Um fio do comprimento errado ainda funciona, mas muito pior: a "orelha de metal" é sintonizada.

Três outras propriedades da antena decorrem da física, e cada uma tem uma consequência visível. A primeira é a **polarização**. O campo elétrico de uma onda eletromagnética oscila numa direção definida, perpendicular à sua propagação, e uma antena responde apenas à componente do campo ao longo do seu próprio comprimento. As antenas das aeronaves são montadas na vertical, de modo que a onda ADS-B chega polarizada verticalmente, e uma antena receptora também precisa estar na vertical; deitada de lado, ela quase não ouve nada, assim como uma onda numa corda sacudida para cima e para baixo é barrada por uma fenda horizontal. A segunda é o **diagrama de irradiação**. Uma antena vertical é mais sensível na direção do horizonte e nada sensível ao longo do próprio eixo, de modo que a sua sensibilidade em três dimensões tem a forma de uma rosquinha com a antena atravessando o buraco. Os receptores, portanto, ouvem rotineiramente aeronaves a 300 km sem dificuldade e perdem por alguns segundos uma que passa diretamente acima, algo que vale a pena observar em qualquer mapa ao vivo. Empilhar vários elementos ressonantes um sobre o outro achata a rosquinha, concentrando a sensibilidade na direção do horizonte, onde estão as aeronaves distantes, à custa da direção vertical; é isso que se entende por **ganho** de antena, e ele é sempre uma redistribuição da sensibilidade, nunca uma criação.

A terceira diz respeito ao que fica entre a antena e o receptor. A antena capta não apenas 1090 MHz, mas todo sinal da vizinhança, inclusive transmissões de telefonia celular a algumas centenas de megahertz de distância que são imensamente mais fortes, de modo que um filtro que deixa passar apenas a faixa aeronáutica é colocado primeiro. O sinal então precisa descer por um cabo, e em 1090 MHz um cabo coaxial perde aproximadamente metade do sinal a cada dez metros; o remédio é um amplificador de baixo ruído junto à antena, antes do cabo, para que o sinal seja forte o bastante para sobreviver à viagem, e não no receptor, onde amplificar amplificaria o ruído do cabo junto com o que restou do sinal. São detalhes, mas são os detalhes que decidem se um receptor no telhado de uma escola ouve as aeronaves no horizonte ou apenas as que estão por perto.

CAPÍTULO 9

Recepção e decodificação

Entre a antena e um ponto no mapa há uma cadeia de cinco estágios. A antena transforma a onda que passa em uma corrente alternada de alguns microvolts. Um filtro e um amplificador de baixo ruído mantêm a faixa de 1090 MHz, rejeitam todo o resto e elevam o sinal mil vezes. Um rádio definido por software sintoniza a frequência e amostra o sinal dois milhões de vezes por segundo, transformando-o em um fluxo de números. Um decodificador procura nesse fluxo o padrão do preâmbulo, lê os 112 bits, confere a paridade e decodifica os campos. E um rastreador reúne as mensagens de cada aeronave em um único registro continuamente atualizado: uma posição, uma trajetória, um rótulo.

O estágio notável é o terceiro. Até cerca de 2010, decodificar 1090 MHz exigia hardware dedicado que custava milhares de euros. Então os hobbistas descobriram que um sintonizador de TV USB de 20 euros continha um chip ao qual se podia mandar sintonizar qualquer frequência e entregar o sinal bruto a um computador. Esse **rádio definido por software** transforma o problema de rádio em um problema de programação: um laptop ou um Raspberry Pi recebe um fluxo de dois milhões de números por segundo descrevendo a intensidade do sinal, e um software livre procura o padrão do preâmbulo, mede qual

metade de cada intervalo de um microssegundo é mais forte, monta 112 bits, calcula o CRC e imprime os campos. O projeto de receptor do kit do fundamental II e ensino médio é exatamente essa cadeia, e uma escola pode montá-lo por menos de 100 euros.

O estágio do rastreador é onde o fluxo de mensagens vira conhecimento. Uma única mensagem de posição, lembre-se, é ambígua até que uma mensagem par e uma ímpar tenham sido pareadas. A velocidade chega separada da posição, o indicativo de chamada separado de novo, e o rastreador costura tudo pelo endereço ICAO, descarta qualquer coisa que falhe na verificação de erros e guarda o último estado conhecido de cada aeronave. Se nenhuma mensagem chega por um minuto, geralmente porque a aeronave desceu abaixo do horizonte, a trajetória expira.

CAPÍTULO 10

De um receptor a um mapa de um continente

Um receptor ouve um círculo de céu de algumas centenas de quilômetros de diâmetro. Um mapa da Europa precisa de centenas deles, e os úteis não estão nas cidades, mas espalhados: nas costas, nos vales, nas ilhas, onde quer que o círculo de outro receptor não alcance. Cada receptor envia as suas mensagens decodificadas, cada uma marcada com a hora de chegada, pela internet a um serviço central. Esse serviço *agrega*: a mesma mensagem de uma aeronave alta costuma chegar de dez ou vinte receptores ao mesmo tempo, e as duplicatas precisam ser reconhecidas e fundidas. Ele também verifica: uma posição que discorda da visão que todos os receptores vizinhos têm da mesma aeronave é provavelmente um erro de decodificação ou um transponder defeituoso, e é sinalizada ou descartada.

Multilateração: encontrando aeronaves que não dizem onde estão

Nem toda aeronave transmite uma posição. Transponders mais antigos respondem ao radar com identidade e altitude, mas não têm entrada de satélite; algumas aeronaves deliberadamente não enviam nenhuma. Ainda assim, as suas transmissões em 1090 MHz chegam ao solo, e uma rede pode localizá-las virando a navegação por satélite do avesso. Se quatro receptores com relógios precisamente sincronizados registram, cada um, o instante em que a mesma transmissão chega, as diferenças entre esses instantes revelam as diferenças de distância: uma mensagem que chegou ao receptor A um microssegundo antes do receptor B foi enviada de um ponto 300 m mais próximo de A do que de B. Todos os pontos com essa propriedade estão sobre uma superfície curva, um hiperboloide, entre A e B. Três superfícies desse tipo, vindas de quatro receptores, se cruzam na aeronave. Isso é a **multilateração**, e ela exige uma sincronização de cerca de um décimo de microssegundo, 30 m, entre receptores a centenas de quilômetros uns dos outros, que os receptores obtêm dos mesmos satélites que a aeronave usa.

A mesma ideia, duas vezes

Navegação por satélite: um receptor, quatro transmissores de posições conhecidas, resolve-se a posição do receptor. Multilateração: um transmissor, quatro receptores de posições conhecidas, resolve-se a posição do transmissor. Nas duas, o que se mede de fato é tempo, e 1 microssegundo são 300 metros.

CAPÍTULO 11

Para que serve, e onde fica alguém

O controle de tráfego aéreo é o primeiro cliente. Em toda a Europa, os controladores veem hoje uma imagem fundida em que o ADS-B, com as suas atualizações a cada meio segundo e a sua precisão de nível de satélite, é combinado com o radar e a multilateração; onde o radar nunca chegou, sobre o Atlântico Norte, o Ártico, o Saara e a maioria dos oceanos, as mensagens ADS-B são captadas por receptores a bordo de satélites de comunicação em órbita baixa, o que permitiu que as aeronaves que cruzam o Atlântico fossem espaçadas muito mais de perto do que antes. As aeronaves são o segundo cliente: um avião de passageiros com "ADS-B In" mostra o tráfego próximo à tripulação e o alimenta no sistema anticolisão. Os aeroportos o usam para rastrear aeronaves e veículos no solo com neblina. Os pesquisadores usam os dados abertos para estudar ruído, consumo de combustível, rastros de condensação e atrasos. E um receptor no telhado de uma escola é, modestamente, um participante de tudo isso.

As fraquezas do sistema decorrem diretamente do seu projeto, e cada uma merece ser entendida, e não apenas listada. Como as mensagens são difundidas às claras, sem criptografia nem assinatura, não há nada na mensagem em si que prove que ela veio de uma aeronave. Um transmissor no solo poderia, ilegalmente, difundir uma mensagem perfeitamente formada descrevendo uma aeronave que não existe, e um receptor a decodificaria sem reclamar. O que protege o sistema não é a mensagem, mas o contexto ao redor dela: um fantasma não aparecerá no radar, não será encontrado pela multilateração e não se comportará como tráfego real, e os centros de controle fazem verificações cruzadas continuamente. Uma versão do protocolo com assinaturas criptográficas é discutida há muitos anos; o obstáculo é menos técnico do que prático, já que todos os transponders do mundo teriam de mudar.

Como a posição depende do receptor de satélite da aeronave, qualquer coisa que perturbe a navegação por satélite perturba o ADS-B. A interferência (jamming) e a falsificação (spoofing) de sinais de satélite se tornaram comuns perto de zonas de conflito, e uma aeronave que atravessa uma área dessas pode não conseguir calcular uma posição, ou pode calcular uma errada. As suas mensagens passam então a carregar uma categoria de integridade degradada, o sistema do controlador as sinaliza, e o radar, a medição independente que o ADS-B nunca pretendeu substituir por completo, assume. A relação entre os dois não é, portanto, de sucessor e antecessor, mas de parceiros com fraquezas complementares.

Como a obrigatoriedade cobre os aviões de passageiros e a maioria das aeronaves maiores, mas não tudo o que voa, o mapa é incompleto por natureza. Aeronaves leves fora do espaço aéreo controlado, planadores, balões e muitas aeronaves militares podem não ter ADS-B algum, e algumas aeronaves leves usam outros sistemas que um receptor de 1090 MHz não ouve. E como a difusão identifica a aeronave, ela pode identificar o seu dono: seguir um determinado jato particular é, na prática, seguir uma determinada pessoa, o que levou a programas que mascaram a matrícula das aeronaves cujos donos assim pedem, e a uma discussão contínua sobre se uma informação que uma aeronave difunde ao mundo pode também ser privada. Essa é uma boa discussão para propor aos alunos mais velhos, porque a física não dá resposta a ela.

CAPÍTULO 12

Uma breve história

1935 a 1945

O radar primário é desenvolvido na Grã-Bretanha, na Alemanha e nos Estados Unidos; ao fim da guerra, transponders de "identificação amigo ou inimigo" respondem aos pulsos de radar com uma resposta codificada, o ancestral do radar secundário.

Anos 1950 a 1960

O radar secundário civil é padronizado: interrogações em 1030 MHz, respostas em 1090 MHz, códigos de identidade Mode A e altitude Mode C.

Anos 1980

O Mode S, com endereços únicos de 24 bits e mensagens de dados, é desenvolvido no Lincoln Laboratory do MIT e adotado pela ICAO. O GPS entra em operação para usuários civis.

Anos 1990 a 2000

O ADS-B é definido e testado, notadamente no Alasca, onde a cobertura de radar era impossível e os acidentes, frequentes. O squitter estendido em 1090 MHz é padronizado internacionalmente.

Anos 2010

Rádios definidos por software baratos transformam a recepção em hobby; surgem redes voluntárias de milhares de receptores. Receptores são lançados em satélites para cobertura oceânica.

2020

O ADS-B se torna obrigatório para a maioria das aeronaves no espaço aéreo controlado nos Estados Unidos (janeiro) e na União Europeia (junho, com transição até o fim do ano). O céu começa a falar, em toda parte, o tempo todo.

Glossário

ADS-B

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (vigilância dependente automática por difusão). Aeronaves difundindo a própria posição.

Altitude barométrica

Altura derivada da pressão do ar, usando uma atmosfera padrão; é o que as aeronaves informam.

CPR

Relato compacto de posição (compact position reporting), o esquema par/ímpar que faz caber uma posição precisa em 34 bits.

CRC

Verificação de redundância cíclica, a verificação de erros de 24 bits que encerra toda mensagem.

Squitter estendido

A transmissão Mode S espontânea de 112 bits que carrega o ADS-B.

GNSS

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

Endereço ICAO

A identidade permanente de 24 bits do transponder de uma aeronave.

Mode S

O padrão de radar secundário seletivo sobre o qual o ADS-B é construído.

Multilateração

Localizar um transmissor a partir das diferenças de tempo de chegada do sinal em vários receptores.

Perda de percurso

O enfraquecimento de um sinal com a distância, seguindo a lei do inverso do quadrado.

Horizonte de rádio

A maior distância em que uma linha reta entre a antena e a aeronave passa livre da Terra.

SDR

Rádio definido por software: um sintonizador que entrega amostras brutas do sinal a um computador para decodificação.

SSR

Radar secundário de vigilância: o solo interroga, o transponder responde.

Transponder

O rádio da aeronave que responde ao radar e transmite o ADS-B em 1090 MHz.

Comprimento de onda

Distância entre cristas sucessivas de uma onda: c / f , 27,5 cm em 1090 MHz.

A SEGUIR**Da teoria à prática: monte o receptor**

Doze capítulos explicaram um sistema que agora você pode segurar na mão. A oficina prática os transforma no trabalho de uma tarde: o que comprar por 100 a 150 euros, como construir e posicionar a antena, como preparar um Raspberry Pi e instalar o feeder da Dataero, e como ver as aeronaves que você ouve aparecerem no mapa ao vivo, creditadas à sua estação. Cada capítulo acima tem uma medição esperando por ele lá: o horizonte de rádio contra aeronaves reais, a lei do inverso do quadrado na coluna de sinal, o ritmo diário do céu.

Abrir a oficina prática <https://radar.dataero.eu/pt-br/learning/workshop>