

CORSO DI RIFERIMENTO - PER OGNI ADULTO

Che cos'è l'ADS-B e come funziona

Dodici capitoli. Non serve alcuna conoscenza preliminare di aviazione o di radio; per gli esempi svolti basta la matematica delle scuole superiori, e si possono saltare senza perdere il filo. Tempo di lettura: circa 50 minuti.

Impara - <https://radar.dataero.eu/it/learning/course> 2026-10-22

INDICE

CAPITOLO 1 Il problema: un cielo pieno di aerei che nessuno può vedere

CAPITOLO 2 Prima dell'ADS-B: trovare gli aerei con il radar

CAPITOLO 3 L'idea: lasciare che sia l'aereo a dircelo

CAPITOLO 4 Come l'aereo sa dove si trova

CAPITOLO 5 Anatomia di un messaggio

CAPITOLO 6 - FISICA L'onda: la radio come luce invisibile

CAPITOLO 7 - FISICA La portata: la curvatura della Terra e l'indebolimento del segnale

CAPITOLO 8 - FISICA Le antenne: catturare un'onda di 27 centimetri

CAPITOLO 9 Ricevere e decodificare

CAPITOLO 10 Da un ricevitore alla mappa di un continente

CAPITOLO 11 A cosa serve e dove non arriva

CAPITOLO 12 Breve storia

Glossario

PROSSIMO PASSO Dalla teoria alla pratica: costruisci il ricevitore

CAPITOLO 1

Il problema: un cielo pieno di aerei che nessuno può vedere

In un normale giorno feriale, circa 30.000 voli attraversano lo spazio aereo europeo. Un aereo di linea in crociera si muove a circa 250 metri al secondo, ovvero 900 km/h; due aerei che si dirigono l'uno verso l'altro si avvicinano di mezzo chilometro ogni secondo. Un pilota che guarda dal finestrino non vede quasi nulla di tutto questo: a 10.000 metri gli altri aerei sono puntini, e comunque le nuvole ne nascondono la maggior parte. Il cielo è una rete stradale tridimensionale senza strade tracciate, e il traffico che vi circola è al tempo stesso veloce e invisibile.

Il controllo del traffico aereo esiste per tenere separato quel traffico. In linea di principio le regole sono semplici: nello spazio aereo controllato, gli aerei vengono mantenuti ad almeno 1.000 piedi (circa 300 metri) di distanza in verticale, oppure a una distanza orizzontale prestabilita, tipicamente 5 miglia nautiche (9,3 km) nelle zone coperte dal radar e molto di più sopra gli oceani. Per applicare queste regole, un controllore deve conoscere, in modo continuo e affidabile, la posizione di ogni aereo nel proprio settore: non dove si trovava un minuto fa, ma dove si trova adesso, a che quota vola e in quale direzione va. L'intero argomento di questo corso è come si ottiene questa conoscenza. Il termine tecnico è **sorveglianza**.

Un numero da tenere a mente

A 900 km/h, un aereo percorre 15 km in un minuto e 250 m in un secondo. Qualsiasi metodo di sorveglianza che si aggiorni lentamente, o con un errore grande, costringe il controllore a tirare a indovinare proprio sulle distanze che contano.

CAPITOLO 2**Prima dell'ADS-B: trovare gli aerei con il radar**

La prima risposta, sviluppata alla fine degli anni Trenta e perfezionata durante la Seconda guerra mondiale, fu il **radar primario**. Una grande antenna rotante emette un impulso di energia radio breve e molto potente. Quando l'impulso colpisce un aereo, una minuscola frazione viene riflessa all'indietro. Il radar misura il tempo che intercorre tra la partenza dell'impulso e il ritorno dell'eco; poiché le onde radio viaggiano alla velocità della luce, 300.000 km/s, quel tempo fornisce la distanza. La direzione in cui puntava l'antenna fornisce l'azimut. Il radar primario è straordinariamente indipendente: l'aereo non ha bisogno di alcuna apparecchiatura, ed è per questo che è ancora usato dai militari. Ma ha debolezze reali. L'eco di un aereo lontano è debolissima, quindi il trasmettitore deve essere enorme. L'eco non dice nulla su chi sia l'aereo né su quanto voli in alto. E l'antenna impiega diversi secondi per compiere una rotazione, per cui ogni aereo viene visto solo una volta ogni 4-12 secondi, durante i quali si è spostato fino a 3 km.

La seconda risposta, il **radar secondario di sorveglianza** (SSR), trasformò l'aereo in un partecipante attivo. Una stazione a terra trasmette una domanda, un'*interrogazione*, a 1030 MHz. Una piccola radio a bordo, il **transponder**, sente la domanda e risponde a 1090 MHz con un proprio segnale potente. Poiché la risposta viene trasmessa anziché riflessa, è milioni di volte più forte di un'eco radar, e poiché è generata da un computer, può trasportare informazioni. Nella forma più antica (Mode A) la risposta contiene un codice identificativo di quattro cifre assegnato dal controllore; nel Mode C contiene anche l'altitudine dell'aereo. Negli anni Ottanta arrivò il **Mode S** ("S" sta per selettivo), in cui ogni transponder ha un indirizzo univoco di 24 bit, può essere interrogato singolarmente e può rispondere con messaggi di dati di 56 o 112 bit. Tieni a mente quel numero, 1090 MHz, e quella parola, Mode S: l'ADS-B è costruito direttamente su entrambi.

Il radar secondario fu un grande passo avanti, ma condivide ancora due limiti con il suo predecessore. L'aereo parla solo quando viene interrogato, quindi a terra serve comunque una stazione interrogante entro la portata, il che esclude oceani, deserti e catene montuose. E la stazione ha ancora bisogno di un'antenna rotante per sapere da quale direzione è arrivata la risposta, per cui ogni aereo viene comunque visto solo una volta per rotazione, e lo schermo del controllore mostra ancora un punto che salta a intervalli di qualche secondo anziché un aereo che si muove con continuità. Per fare meglio serviva qualcosa di fundamentalmente diverso: un modo perché l'aereo comunicasse la propria posizione senza che nessuno glielo chiedesse, e senza che da terra si dovesse misurare alcunché.

CAPITOLO 3

L'idea: lasciare che sia l'aereo a dircelo

Negli anni Novanta erano maturate due tecnologie che rendevano possibile un approccio diverso. La navigazione satellitare dava a ogni aereo adeguatamente equipaggiato una conoscenza precisa della propria posizione, molto migliore di quella che qualsiasi radar potesse misurare da terra. E il transponder Mode S forniva già una radio in grado di inviare messaggi di dati a 1090 MHz. Mettendo insieme le due cose, la logica è irresistibile: invece di far faticare le stazioni a terra per misurare dove si trova l'aereo, lasciamo che sia l'aereo, che lo sa già, a dirlo semplicemente, a intervalli regolari, a tutti. Questo è l'ADS-B, e le quattro parole del suo nome ne sono una descrizione precisa.

È **automatica** (Automatic): nulla innesca una trasmissione. Il transponder trasmette secondo il proprio ritmo, circa due volte al secondo, che ci sia o meno una stazione a terra entro la portata e che il pilota faccia o meno qualcosa; anzi, in volo il pilota non può fermarla se non spegnendo il transponder, cosa che è vietata. È **dipendente** (Dependent): ogni elemento del messaggio proviene dalle apparecchiature dell'aereo stesso, la posizione dal suo ricevitore satellitare e l'altitudine dal suo altimetro barometrico, e a terra non si misura nulla; ci si fida di ciò che viene comunicato. È **sorveglianza** (Surveillance): il suo scopo è far sapere agli altri dove si trova l'aereo, al controllo del traffico aereo e agli aerei vicini, a differenza della navigazione, che è l'aereo che sa da sé dove si trova, e della comunicazione, che è parlare con il pilota. Ed è una **trasmissione circolare** (Broadcast): il messaggio non ha destinatario, né conferma di ricezione, né cifratura, e chiunque abbia un ricevitore entro la portata sente esattamente la stessa cosa, che si tratti di un centro di controllo, di un altro aereo di linea o di una scuola.

"Dipendente" è la parola che preoccupa gli ingegneri e quella che più merita una spiegazione. Il radar effettua una misura indipendente: se gli strumenti dell'aereo sbagliano, al radar non importa. L'ADS-B eredita ogni errore del sistema di navigazione dell'aereo, e se quel sistema viene ingannato o si guasta, la posizione trasmessa è sbagliata con la stessa sicurezza. È per questo che ogni messaggio ADS-B contiene, accanto alla posizione, una dichiarazione di quanto l'aereo si fidi della propria posizione (le categorie di integrità e di accuratezza che incontreremo nel capitolo 5), ed è per questo che il radar non è stato spento.

"Trasmissione circolare" è la parola che rende possibile questo corso. Poiché i messaggi vengono inviati in chiaro a tutti, li sente non solo il controllo del traffico aereo ma qualsiasi ricevitore sintonizzato su 1090 MHz, compreso quello che potresti installare sul tetto di una scuola. La stessa proprietà è all'origine del limite principale del sistema, discusso nel capitolo 11: un messaggio che chiunque può leggere è anche un messaggio che chiunque può falsificare.

CAPITOLO 4

Come l'aereo sa dove si trova

Tutto nell'ADS-B si basa sul fatto che l'aereo conosca la propria posizione, quindi questo capitolo è dedicato alla navigazione satellitare. Il termine generico è **GNSS**, Global Navigation Satellite System (sistema globale di navigazione satellitare); l'americano GPS è il più noto, e l'europeo Galileo, il russo GLONASS e il cinese BeiDou funzionano secondo lo stesso principio. Ogni sistema è una costellazione di circa 24-30 satelliti in orbita a circa 20.000 km di quota, ben al di sopra degli aerei, ciascuno dotato di un

orologio atomico preciso a pochi miliardesimi di secondo. Ogni satellite trasmette di continuo un segnale radio che dice, in sostanza: "sono il satellite numero N, la mia posizione è questa, e l'istante in cui ho inviato questo messaggio è esattamente T".

Il ricevitore a bordo dell'aereo sente quel segnale un po' più tardi, perché le onde radio impiegano tempo a viaggiare: a 300.000 km/s, i 20.000 km dal satellite richiedono circa 67 millesimi di secondo. Il ricevitore confronta l'orario indicato nel messaggio con l'istante di arrivo. La differenza, moltiplicata per la velocità della luce, è la distanza da quel satellite. Una distanza colloca il ricevitore da qualche parte su una sfera attorno a quel satellite. Due sfere si intersecano in una circonferenza; tre sfere in due punti, uno dei quali di solito è assurdo (in profondità sotto terra o lontanissimo nello spazio) e viene scartato. Quindi tre satelliti basterebbero, se il ricevitore avesse un orologio perfetto.

Non ce l'ha. Un orologio atomico costa decine di migliaia di euro e non ci starebbe; il ricevitore ha un economico orologio al quarzo che può sbagliare di molto più della precisione temporale richiesta. Ecco la parte elegante. Il ricevitore tratta l'errore del proprio orologio come una quarta incognita, accanto alle tre coordinate della posizione, e ascolta un quarto satellite. Quattro equazioni, quattro incognite: il ricevitore calcola la propria posizione e, come sottoprodotto, corregge il proprio orologio entro qualche decina di nanosecondi. Ecco perché un ricevitore satellitare ha bisogno di almeno quattro satelliti in vista, e perché ogni ricevitore GNSS è anche, tra l'altro, uno degli orologi più precisi dell'edificio.

Vale la pena soffermarsi sugli ordini di grandezza, perché spiegano come la navigazione satellitare sia in realtà un esercizio di misura del tempo, in cui la geometria viene quasi in secondo piano. La luce percorre 30 centimetri in un nanosecondo e 300 metri in un microsecondo, quindi un errore di tempo di un milionesimo di secondo diventa un errore di posizione di 300 metri, e la precisione di pochi metri di un ricevitore moderno corrisponde a una misura del tempo dell'ordine di una decina di nanosecondi. Prendiamo un caso concreto. Un satellite marca un segnale con l'orario 12:00:00,000 000 000; il ricevitore dell'aereo lo sente alle 12:00:00,070 000 000. Il tempo di percorrenza è 0,070 s, quindi la distanza è $0,070 \times 300.000 \text{ km/s} = 21.000 \text{ km}$. Se l'orologio del ricevitore fosse stato avanti anche di un solo microsecondo, avrebbe calcolato 21.000,3 km, 300 metri di troppo, e lo stesso errore si sarebbe insinuato anche nella distanza da ogni altro satellite. È proprio questo errore comune che il quarto satellite mette in luce ed elimina.

Due altitudini, non una

I satelliti forniscono un'altezza sopra la superficie matematica della Terra, un'altitudine *geometrica*. Eppure l'altitudine che un aereo trasmette ai fini del traffico aereo non è questa. È l'**altitudine barometrica**, ricavata dalla pressione dell'aria all'esterno dell'aereo, misurata attraverso una piccola apertura nella fusoliera chiamata presa statica. La pressione dell'aria diminuisce con la quota secondo una legge nota (circa 1 hPa ogni 8 metri vicino al suolo, più lentamente salendo), e ogni altimetro del mondo converte la pressione in quota usando la stessa atmosfera standard, riferita a 1013,25 hPa al livello del mare. In una giornata di pressione insolita, l'altitudine barometrica di ogni aereo è sbagliata della stessa quantità, ed è esattamente questo il punto: ciò che conta per la separazione non è la vera altezza sul mare, ma che due aerei che leggono entrambi "livello di volo 350" siano davvero a 300 metri di distanza da uno che legge "livello di volo 340". L'ADS-B trasmette l'altitudine barometrica nei suoi messaggi di posizione, a passi di 25 piedi (7,6 m), e trasmette separatamente la differenza tra questa e l'altezza satellitare, così che un ricevitore possa ricavarle entrambe.

CAPITOLO 5

Anatomia di un messaggio

Il messaggio ADS-B usato dagli aerei di linea di tutto il mondo è una trasmissione Mode S chiamata **extended squitter**; "squitter" è un vecchio termine del gergo radar per una trasmissione inviata spontaneamente anziché in risposta, ed "extended" (esteso) perché, con i suoi 112 bit, è lungo il doppio della risposta Mode S originale. Gli ingegneri scrivono "1090ES" per "1090 MHz extended squitter". Ogni trasmissione dura in tutto 120 microsecondi: un *preambolo* di 8 microsecondi, una sequenza fissa di quattro impulsi che permette al ricevitore di riconoscere l'inizio di un messaggio e di sincronizzare il proprio orologio, seguita da 112 bit di dati al ritmo di un bit per microsecondo.

Come si invia un bit: la modulazione a posizione d'impulso

Ogni intervallo di un microsecondo dedicato a un bit è diviso in due metà. Un impulso di energia radio nella prima metà e silenzio nella seconda significa 1; silenzio e poi un impulso significa 0. C'è quindi esattamente un impulso per bit, qualunque siano i dati, e il ricevitore deve solo decidere quale metà di ciascun intervallo fosse più forte. Questo schema, la modulazione a posizione d'impulso, è robusto contro i tipi di rumore e di affievolimento che un segnale subisce nel suo percorso da un transponder a un'antenna lontana, ed è economico da decodificare.

Quattro bit in modulazione a posizione d'impulso: 1, 0, 1, 1



I 112 bit

DF	CA	indirizzo ICAO	ME - il contenuto utile	PI
5 bit	3 bit	24 bit	56 bit	24 bit
formato di downlink	capacità	identità univoca dell'aereo	posizione, altitudine, velocità, nominativo o stato, a seconda del type code nei primi 5 bit	controllo d'errore (CRC)

I primi cinque bit, il formato di downlink, indicano di che tipo di messaggio Mode S si tratta; il valore 17 significa "ADS-B da un transponder Mode S". L'**indirizzo ICAO** di 24 bit è l'identità permanente dell'aereo, assegnata al momento dell'immatricolazione: esistono 2^{24} , ovvero 16.777.216, indirizzi possibili, assegnati a blocchi agli Stati dall'ICAO, l'organismo delle Nazioni Unite per l'aviazione civile. Gli aerei belgi, per esempio, hanno indirizzi compresi tra 448000 e 44FFFF in esadecimale. A differenza del codice a quattro cifre del vecchio Mode A, questo indirizzo non cambia mai e non è mai condiviso, quindi un ricevitore può essere sicuro di quale aereo sta ascoltando fin dal primissimo messaggio.

Il campo **ME** di 56 bit è il contenuto vero e proprio, e i suoi primi cinque bit, il *type code*, indicano che cosa significa il resto. I type code da 1 a 4 contengono il nominativo dell'aereo, per esempio BEL1234 o RYR7KL, sotto forma di otto caratteri da sei bit. I codici da 9 a 18 contengono una posizione in volo con

altitudine barometrica; da 20 a 22 la stessa con altitudine satellitare. Il codice 19 contiene la velocità: la velocità al suolo scomposta nelle componenti est-ovest e nord-sud, la velocità verticale e la differenza tra altitudine barometrica e satellitare. I codici 28, 29 e 31 contengono lo stato: codici di emergenza, altitudine selezionata e le categorie di integrità e di accuratezza che indicano quanto ci si possa fidare della posizione trasmessa (un "NIC" pari a 8, per esempio, garantisce con alta probabilità che la posizione reale sia entro 185 m da quella comunicata).

Gli ultimi 24 bit sono un **controllo di ridondanza ciclico** (CRC), un numero calcolato dagli 88 bit precedenti mediante una divisione polinomiale fissa. Il ricevitore ripete il calcolo sui bit che ha decodificato; se il risultato non coincide, almeno un bit si è alterato durante il tragitto e il messaggio viene scartato. Poiché un impulso di un microsecondo può facilmente andare perso nel rumore o sovrapporsi al messaggio di un altro aereo, è questo controllo a tenere le posizioni corrette lontane dallo schermo del controllore. Un messaggio reale, così come lo registrerebbe un ricevitore, si presenta così:

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: formato di downlink 17, capacità 5. 4840D6: indirizzo ICAO, un aereo olandese. 20...: type code 4, un messaggio di identificazione, che decodificato dà il nominativo KLM1023. 576098: il controllo d'errore.

La Terra in 34 bit

Un messaggio di posizione ha soltanto 17 bit per la latitudine e 17 per la longitudine. Sono 131.072 passi lungo l'intero globo, circa 300 m ciascuno all'equatore: non basta affatto. L'ADS-B risolve il problema con la **codifica compatta della posizione** (compact position reporting, CPR). La Terra è suddivisa in zone; i 17 bit danno una posizione molto precisa (a circa 5 m) all'interno di una zona, ma non dicono quale zona. L'aereo alterna due griglie di zone leggermente diverse, i messaggi "pari" e "dispari", e un ricevitore che ne ha sentito uno di ciascun tipo può determinare la zona senza ambiguità. Fatto questo, basta un solo messaggio per seguire l'aereo, perché in mezzo secondo difficilmente può essere passato in un'altra zona. È un trucco ingegnoso che raddoppia la precisione utile senza costare un solo bit.

Con quale frequenza

Un transponder in volo invia un messaggio di posizione due volte al secondo, un messaggio di velocità due volte al secondo e il proprio nominativo ogni cinque secondi, più messaggi di stato a intervalli più lunghi, per un totale di circa quattro o cinque extended squitter al secondo. Ciascuno dura 120 microsecondi; in realtà il transponder trasmette ADS-B per molto meno di un millesimo del tempo. Per il resto del secondo è in ascolto delle interrogazioni radar a 1030 MHz e delle richieste anticollisione degli altri aerei, e risponde a entrambe.

CAPITOLO 6 - FISICA

L'onda: la radio come luce invisibile

Il messaggio lascia l'aereo sotto forma di **onda radio**, e l'idea in assoluto più utile di questo corso è che un'onda radio e un raggio di luce sono la stessa cosa. Entrambi sono onde elettromagnetiche: un insieme di campi elettrici e magnetici che oscillano insieme e viaggiano nello spazio alla velocità della luce, c , pari

a 299.792.458 metri al secondo, ovvero, con buona approssimazione, 300.000 km/s. Ciò che distingue un'onda radio dalla luce verde, dai raggi X di un ospedale o dalle microonde di un forno da cucina è soltanto la rapidità con cui oscillano i campi: la **frequenza**, f , misurata in hertz (oscillazioni al secondo).

Poiché l'onda viaggia a velocità costante, la frequenza determina la distanza tra una cresta e la successiva, la **lunghezza d'onda**, λ . In un secondo l'onda percorre c metri e compie f oscillazioni, quindi ogni oscillazione occupa c / f metri:

$$c = f \times \lambda$$

Per l'ADS-B: $\lambda = 300.000.000 / 1.090.000.000 = 0,275$ m. L'onda tra l'aereo e la tua antenna ha creste distanti 27,5 cm, più o meno la lunghezza di un righello scolastico.

Onda	Frequenza	Lunghezza d'onda	Nota
Radio FM	100 MHz	3 m	Le antenne delle auto ne sono una frazione
ADS-B / Mode S	1090 MHz	27,5 cm	Usata anche dalle risposte dei transponder radar
Telefono cellulare (banda 4G)	1800 MHz	17 cm	Una vicina di casa nello spettro
Wi-Fi, forno a microonde	2450 MHz	12 cm	Stessa frequenza, potenze molto diverse
Luce verde visibile	560.000.000 MHz	0,000 54 mm	Frequenza mezzo milione di volte più alta

Due conseguenze contano per tutto ciò che segue. Primo, poiché l'onda è luce, viaggia in linea retta a meno che qualcosa non la devii o la blocchi, e non attraversa la Terra. Questo determina la portata del sistema, argomento del capitolo 7. Secondo, poiché la sua lunghezza d'onda è di 27,5 cm, le strutture metalliche che interagiscono più fortemente con essa, le antenne, hanno dimensioni di quell'ordine, argomento del capitolo 8.

Perché la radio non è suono

La confusione più comune, negli adulti come nei bambini, è quella tra radio e suono, probabilmente perché una "radio" è una scatola che produce suono. Sono fenomeni del tutto diversi. Il suono è un'onda di pressione nell'aria, una catena di molecole che spingono le loro vicine; ha bisogno di un materiale in cui propagarsi, si muove a 340 m/s e non può attraversare il vuoto. La radio non ha bisogno di nulla: attraversa il vuoto tra un satellite e l'aereo e si muove quasi un milione di volte più veloce. Il rumore dei motori dell'aereo e il suo messaggio ADS-B partono nello stesso istante; il messaggio raggiunge un ricevitore a 20 km di distanza in 67 microsecondi, il suono un minuto intero dopo.

Perché 1090 MHz

La frequenza è un'eredità. Accordi internazionali degli anni Cinquanta riservarono la banda da 960 a 1215 MHz alla radionavigazione aeronautica, e 1090 MHz divenne la frequenza di risposta dei transponder del radar secondario. Quando fu progettato l'ADS-B, riutilizzare il transponder già installato su ogni aereo di linea costava molto meno che montare una nuova radio, così l'ADS-B divenne

semplicemente un'altra cosa che il transponder Mode S dice a 1090 MHz. Negli Stati Uniti, gli aerei più piccoli che volano sotto i 5.500 m circa possono usare invece un secondo sistema, l'UAT a 978 MHz, ed è per questo che lì i ricevitori ascoltano spesso entrambe le frequenze.

CAPITOLO 7 - FISICA

La portata: la curvatura della Terra e l'indebolimento del segnale

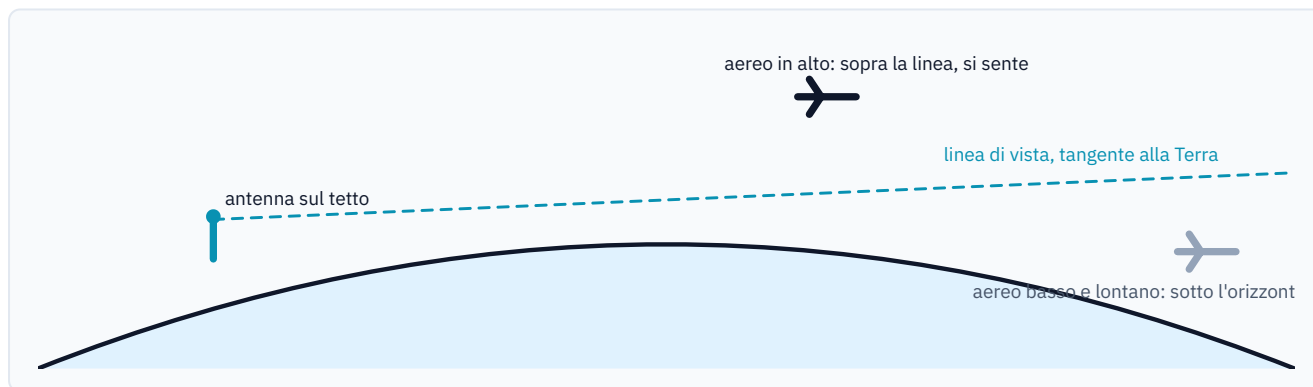
Un transponder trasmette con una potenza di picco di qualche centinaio di watt. Da quanto lontano si può sentire un segnale del genere? A limitarlo sono due cose molto diverse, ed è bene tenerle distinte: la geometria, che fissa un limite netto, e la potenza, che ne fissa uno sfumato.

L'orizzonte radio

A 1090 MHz, la radio si comporta come la luce: viaggia in linea retta e non si curva attorno alla Terra. Un'antenna a terra può quindi sentire un aereo solo finché tra i due esiste una linea retta che non attraversa il suolo. Per un osservatore in superficie, l'orizzonte è il punto in cui quella linea sfiora appena la Terra. Più l'aereo è in alto, più quel punto di tangenza è lontano; più l'antenna è in alto, più lontano ancora. La geometria della tangente a una sfera dà un risultato semplice: la distanza dall'orizzonte in chilometri è circa 3,57 volte la radice quadrata dell'altezza in metri. L'atmosfera curva leggermente le onde radio verso il basso, il che allunga l'orizzonte di circa il 15 per cento, quindi gli ingegneri usano 4,12:

$$d \text{ (km)} = 4,12 \times (\sqrt{h \text{ aereo}} + \sqrt{h \text{ antenna}}) \quad \text{altezze in metri}$$

Aereo a 11.000 m, antenna su un tetto a 20 m: $4,12 \times (104,9 + 4,5) = 451$ km. Aereo a 1.000 m, stesso tetto: $4,12 \times (31,6 + 4,5) = 149$ km. Aereo a terra a 15 km di distanza: non si sente affatto, a meno che il terreno in mezzo non sia piatto e sgombro.



Questo spiega la forma caratteristica della copertura di un ricevitore: un cerchio di 400 km o più per il traffico in quota, che si riduce a qualche decina di chilometri per gli aerei in avvicinamento, e quasi nulla per gli aerei a terra, salvo all'aeroporto accanto. Spiega anche perché l'altezza del ricevitore conta molto più della sua qualità, e perché una collina, un edificio alto o perfino l'ala stessa dell'aereo, quando vira allontanandosi da te, possono interrompere un segnale all'istante.

La legge dell'inverso del quadrato

Entro l'orizzonte, il segnale si indebolisce con la distanza. L'antenna di un transponder irradia in tutte le direzioni orizzontali, quindi la sua potenza si distribuisce su una sfera sempre più grande. La superficie di una sfera cresce con il quadrato del raggio, quindi la potenza che arriva su un'antenna di dimensioni fisse

diminuisce con il quadrato della distanza: a distanza doppia, un quarto della potenza; a distanza decupla, un centesimo. Gli ingegneri esprimono questo fenomeno come *attenuazione di tratta* in decibel, e a 1090 MHz su 400 km si arriva a circa 145 dB, il che significa che la potenza ricevuta è circa 10 alla 14,5 volte più piccola di quella trasmessa. Un impulso di 250 watt arriva come circa un decimo di miliardesimo di milliwatt. Un buon ricevitore riesce a rilevarlo, a malapena, ed è per questo che l'orizzonte geometrico e il limite di potenza coincidono a qualche centinaio di chilometri: il sistema è stato progettato così.

I due limiti interagiscono in un modo che vale la pena capire. Entro l'orizzonte, un segnale forte da un aereo vicino e uno debole da un aereo lontano vengono decodificati entrambi perfettamente, perché lo schema a posizione d'impulso del capitolo 5 chiede soltanto quale metà di ciascun intervallo di bit fosse più forte, non quanto forte. Il segnale non perde gradualmente utilità man mano che l'aereo si allontana; resta decodificabile finché, da qualche parte vicino all'orizzonte, o la geometria lo interrompe o il rumore del ricevitore finisce per sommergerlo, e la traccia si ferma. Ecco perché le mappe di copertura hanno bordi netti, e perché gli aerei più lontani che un ricevitore sente sono quasi sempre quelli più in alto.

CAPITOLO 8 - FISICA

Le antenne: catturare un'onda di 27 centimetri

Un'antenna è un conduttore sagomato in modo che un'onda elettromagnetica che la attraversa metta in moto gli elettroni al suo interno all'unisono, producendo una minuscola corrente alternata che un ricevitore può amplificare. Nel trasmettitore accade l'inverso: una corrente alternata nell'antenna dell'aereo genera l'onda. L'efficienza di questo scambio dipende dalle dimensioni del conduttore rispetto alla lunghezza d'onda. Un filo dritto risponde con la massima intensità, cioè *risuona*, quando è lungo mezza lunghezza d'onda, così che la corrente che va avanti e indietro lungo il filo si accorda esattamente con l'oscillazione dell'onda, come un'altalena spinta al suo ritmo naturale. Per 1090 MHz, mezza lunghezza d'onda corrisponde a 13,75 cm.

La forma pratica più comune è il **monopolo a quarto d'onda**: un'asta verticale lunga un quarto di lunghezza d'onda, 6,9 cm, montata su una superficie conduttrice, il *piano di massa*. Il piano di massa funziona come uno specchio, quindi l'asta e il suo riflesso si comportano insieme come un'antenna a mezz'onda. È per questo che l'antenna ADS-B di un aereo è una piccola pinna alta pochi centimetri sulla fusoliera, che fa da piano di massa, ed è per questo che l'antenna di un appassionato è un corto filo su un coperchio di latta. Un filo della lunghezza sbagliata funziona comunque, ma molto peggio: l'"orecchio di metallo" è accordato.

Dalla fisica discendono altre tre proprietà dell'antenna, ciascuna con una conseguenza visibile. La prima è la **polarizzazione**. Il campo elettrico di un'onda elettromagnetica oscilla in una direzione precisa, perpendicolare alla direzione di propagazione, e un'antenna risponde solo alla componente del campo lungo il proprio asse. Le antenne degli aerei sono montate in verticale, quindi l'onda ADS-B arriva polarizzata verticalmente, e anche l'antenna ricevente deve essere verticale; coricata su un lato non sente quasi nulla, così come un'onda su una corda agitata su e giù viene bloccata da una fessura orizzontale. La seconda è il **diagramma di radiazione**. Un'antenna verticale è più sensibile verso l'orizzonte e per nulla lungo il proprio asse, così che la sua sensibilità nelle tre dimensioni ha la forma di una ciambella con l'antenna infilata nel buco. Per questo i ricevitori sentono abitualmente senza difficoltà aerei a 300 km di distanza e ne perdono per qualche secondo uno che passa proprio sopra la testa, cosa che vale la pena osservare su qualsiasi mappa in tempo reale. Sovrapporre più elementi risonanti l'uno

sull'altro schiaccia la ciambella, concentrando la sensibilità verso l'orizzonte, dove si trovano gli aerei lontani, a scapito della verticale; è questo che si intende per **guadagno** di un'antenna, ed è sempre una ridistribuzione della sensibilità, mai una sua creazione.

La terza riguarda ciò che sta tra l'antenna e il ricevitore. L'antenna capta non solo i 1090 MHz ma ogni segnale nei dintorni, comprese le trasmissioni della telefonia mobile a poche centinaia di megahertz di distanza, enormemente più forti, quindi per primo si mette un filtro che lascia passare solo la banda aeronautica. Il segnale deve poi percorrere un cavo, e a 1090 MHz un cavo coassiale perde circa metà del segnale ogni dieci metri; il rimedio è un amplificatore a basso rumore all'antenna, prima del cavo, così che il segnale sia abbastanza forte da sopravvivere al tragitto, anziché al ricevitore, dove amplificare significherebbe amplificare il rumore del cavo insieme a ciò che resta del segnale. Sono dettagli, ma sono i dettagli che decidono se un ricevitore sul tetto di una scuola sente gli aerei all'orizzonte o solo quelli vicini.

CAPITOLO 9

Ricevere e decodificare

Tra l'antenna e un puntino su una mappa c'è una catena di cinque stadi. L'antenna trasforma l'onda in transito in una corrente alternata di pochi microvolt. Un filtro e un amplificatore a basso rumore conservano la banda dei 1090 MHz, scartano tutto il resto e amplificano il segnale di mille volte. Una radio definita dal software si sintonizza sulla frequenza e campiona il segnale due milioni di volte al secondo, trasformandolo in un flusso di numeri. Un decodificatore cerca in quel flusso la sequenza del preambolo, legge i 112 bit, verifica la parità e decodifica i campi. E un tracker riunisce i messaggi di ciascun aereo in un unico record aggiornato di continuo: una posizione, una traccia, un'etichetta.

Lo stadio notevole è il terzo. Fino al 2010 circa, decodificare i 1090 MHz richiedeva hardware dedicato del costo di migliaia di euro. Poi alcuni appassionati scoprirono che un sintonizzatore TV USB da 20 euro conteneva un chip a cui si poteva chiedere di sintonizzarsi su qualsiasi frequenza e di passare il segnale grezzo a un computer. Questa **radio definita dal software** (SDR) trasforma il problema radio in un problema di programmazione: un portatile o un Raspberry Pi riceve un flusso di due milioni di numeri al secondo che descrivono l'intensità del segnale, e un software libero cerca la sequenza del preambolo, misura quale metà di ciascun intervallo di un microsecondo è più forte, compone i 112 bit, calcola il CRC e stampa i campi. Il progetto di ricevitore del kit per la secondaria è esattamente questa catena, e una scuola può costruirlo con meno di 100 euro.

Lo stadio del tracker è quello in cui il flusso di messaggi diventa conoscenza. Un singolo messaggio di posizione, ricorda, è ambiguo finché non sono stati abbinati un messaggio pari e uno dispari. La velocità arriva separatamente dalla posizione, il nominativo separatamente ancora, e il tracker li ricuce insieme tramite l'indirizzo ICAO, scarta tutto ciò che non supera il controllo d'errore e conserva l'ultimo stato noto di ogni aereo. Se per un minuto non arriva alcun messaggio, di solito perché l'aereo è sceso sotto l'orizzonte, la traccia scade.

CAPITOLO 10

Da un ricevitore alla mappa di un continente

Un ricevitore sente un cerchio di cielo di qualche centinaio di chilometri di diametro. Una mappa dell'Europa ne richiede centinaia, e quelli utili non stanno nelle città ma sono sparsi: sulle coste, nelle valli, sulle isole, ovunque non arrivi il cerchio di un altro ricevitore. Ogni ricevitore invia i messaggi decodificati, ciascuno marcato con l'istante di arrivo, tramite internet a un servizio centrale. Quel servizio li *aggrega*: lo stesso messaggio di un aereo in quota arriva in genere da dieci o venti ricevitori contemporaneamente, e i duplicati devono essere riconosciuti e fusi. E li verifica: una posizione in disaccordo con quanto vedono tutti i ricevitori vicini dello stesso aereo è probabilmente un errore di decodifica o un transponder difettoso, e viene segnalata o scartata.

Multilaterazione: trovare gli aerei che non dicono dove sono

Non tutti gli aerei trasmettono una posizione. I transponder più vecchi rispondono al radar con identità e altitudine ma non hanno un ingresso satellitare; alcuni aerei, di proposito, non ne inviano nessuna. Eppure le loro trasmissioni a 1090 MHz arrivano comunque a terra, e una rete può localizzarli capovolgendo la navigazione satellitare. Se quattro ricevitori con orologi sincronizzati con precisione registrano ciascuno l'istante di arrivo della stessa trasmissione, le differenze tra quegli istanti rivelano le differenze di distanza: un messaggio arrivato al ricevitore A un microsecondo prima che al ricevitore B è stato inviato da un punto 300 m più vicino ad A che a B. Tutti i punti con questa proprietà giacciono su una superficie curva, un iperboloide, tra A e B. Tre di queste superfici, ottenute da quattro ricevitori, si intersecano nella posizione dell'aereo. È la **multilaterazione**, ed esige una precisione temporale di circa un decimo di microsecondo, 30 m, tra ricevitori distanti centinaia di chilometri, che i ricevitori ottengono dagli stessi satelliti usati dall'aereo.

La stessa idea, due volte

Navigazione satellitare: un ricevitore, quattro trasmettitori di posizione nota, si calcola la posizione del ricevitore. Multilaterazione: un trasmettitore, quattro ricevitori di posizione nota, si calcola la posizione del trasmettitore. In entrambi i casi ciò che si misura davvero è il tempo, e 1 microsecondo equivale a 300 metri.

CAPITOLO 11

A cosa serve e dove non arriva

Il primo utilizzatore è il controllo del traffico aereo. In tutta Europa i controllori vedono ormai un quadro integrato in cui l'ADS-B, con i suoi aggiornamenti due volte al secondo e la sua precisione di livello satellitare, è combinato con il radar e la multilaterazione; dove il radar non è mai arrivato, sopra l'Atlantico settentrionale, l'Artico, il Sahara e la maggior parte degli oceani, i messaggi ADS-B vengono captati da ricevitori a bordo di satelliti di comunicazione in orbita bassa, il che ha permesso di distanziare gli aerei che attraversano l'Atlantico molto meno di prima. Il secondo utilizzatore sono gli aerei stessi: un aereo di linea dotato di "ADS-B In" mostra all'equipaggio il traffico vicino e lo fornisce al sistema anticollisione. Gli aeroporti lo usano per seguire aerei e veicoli a terra nella nebbia. I ricercatori usano i dati aperti per studiare rumore, consumo di carburante, scie di condensazione e ritardi. E un ricevitore sul tetto di una scuola partecipa, nel suo piccolo, a tutto questo.

Le debolezze del sistema derivano direttamente dalla sua progettazione, e ciascuna merita di essere capita, non soltanto elencata. Poiché i messaggi vengono trasmessi in chiaro, né cifrati né firmati, nel messaggio stesso non c'è nulla che dimostri che provenga da un aereo. Un trasmettitore a terra potrebbe, illegalmente, diffondere un messaggio perfettamente formato che descrive un aereo inesistente, e un ricevitore lo decodificherebbe senza batter ciglio. A proteggere il sistema non è il messaggio ma il contesto che lo circonda: un fantasma non comparirà sul radar, non verrà localizzato dalla multilaterazione e non si comporterà come il traffico reale, e i centri di controllo effettuano verifiche incrociate di continuo. Da molti anni si discute di una versione del protocollo con firme crittografiche; l'ostacolo è più pratico che tecnico, perché si dovrebbe cambiare ogni transponder del mondo.

Poiché la posizione dipende dal ricevitore satellitare dell'aereo, tutto ciò che disturba la navigazione satellitare disturba l'ADS-B. Il disturbo intenzionale (jamming) e la falsificazione (spoofing) dei segnali satellitari sono diventati frequenti vicino alle zone di conflitto, e un aereo che attraversa una di queste aree può non riuscire a calcolare una posizione, o calcolarne una sbagliata. I suoi messaggi riportano allora una categoria di integrità degradata, il sistema del controllore li segnala e il radar, la misura indipendente che l'ADS-B non doveva mai sostituire del tutto, subentra. Il rapporto tra i due non è quindi quello tra successore e predecessore, ma tra partner con debolezze complementari.

Poiché l'obbligo riguarda gli aerei di linea e la maggior parte degli aeromobili più grandi, ma non tutto ciò che vola, la mappa è incompleta per costruzione. Gli aerei leggeri fuori dallo spazio aereo controllato, gli alianti, le mongolfiere e molti aerei militari possono non avere affatto l'ADS-B, e alcuni aerei leggeri usano altri sistemi che un ricevitore a 1090 MHz non sente. E poiché la trasmissione identifica l'aereo, può identificarne il proprietario: seguire un determinato jet privato significa, di fatto, seguire una determinata persona, il che ha portato a programmi che mascherano le marche degli aerei i cui proprietari lo richiedono, e a un dibattito tuttora aperto sulla possibilità che un'informazione che un aereo trasmette al mondo sia anche privata. È un'ottima domanda da porre agli studenti più grandi, perché la fisica non le dà alcuna risposta.

CAPITOLO 12

Breve storia

Dal 1935 al 1945

Il radar primario viene sviluppato in Gran Bretagna, Germania e Stati Uniti; alla fine della guerra, i transponder di "identificazione amico o nemico" (IFF) rispondono agli impulsi radar con una risposta codificata, antenata del radar secondario.

Anni Cinquanta e Sessanta

Il radar secondario civile viene standardizzato: interrogazioni a 1030 MHz, risposte a 1090 MHz, codici identificativi Mode A e altitudine Mode C.

Anni Ottanta

Il Mode S, con indirizzi univoci di 24 bit e messaggi di dati, viene sviluppato al Lincoln Laboratory del MIT e adottato dall'ICAO. Il GPS diventa operativo per gli utenti civili.

Anni Novanta e Duemila

L'ADS-B viene definito e sperimentato, in particolare in Alaska, dove una copertura radar era impossibile e gli incidenti frequenti. L'extended squitter a 1090 MHz viene standardizzato a livello internazionale.

Anni Dieci

Le radio definite dal software a basso costo fanno della ricezione un hobby; nascono reti di volontari con migliaia di ricevitori. Vengono lanciati ricevitori a bordo di satelliti per la copertura oceanica.

2020

L'ADS-B diventa obbligatorio per la maggior parte degli aerei nello spazio aereo controllato negli Stati Uniti (a gennaio) e nell'Unione europea (a giugno, con una transizione fino alla fine dell'anno). Il cielo comincia a parlare, ovunque, in ogni momento.

Glossario

ADS-B

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (sorveglianza dipendente automatica - trasmissione). Aerei che trasmettono la propria posizione.

Altitudine barometrica

Quota ricavata dalla pressione dell'aria in base a un'atmosfera standard; è quella che gli aerei comunicano.

CPR

Compact position reporting, la codifica compatta della posizione: lo schema pari/dispari che fa stare una posizione precisa in 34 bit.

CRC

Controllo di ridondanza ciclico, il controllo d'errore di 24 bit che chiude ogni messaggio.

Squitter esteso

La trasmissione spontanea Mode S di 112 bit che trasporta l'ADS-B.

GNSS

Sistema globale di navigazione satellitare: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou.

Indirizzo ICAO

L'identità permanente di 24 bit del transponder di un aereo.

Mode S

Lo standard di radar secondario selettivo su cui è costruito l'ADS-B.

Multilaterazione

Localizzazione di un trasmettitore a partire dalle differenze nei tempi di arrivo del segnale a più ricevitori.

Attenuazione di tratta

L'indebolimento di un segnale con la distanza, secondo la legge dell'inverso del quadrato.

Orizzonte radio

La distanza massima alla quale una linea retta tra antenna e aereo non viene intercettata dalla Terra.

SDR

Radio definita dal software: un sintonizzatore che passa i campioni grezzi del segnale a un computer per la decodifica.

SSR

Radar secondario di sorveglianza: la stazione a terra interroga, il transponder risponde.

Transponder

La radio di bordo che risponde al radar e trasmette l'ADS-B a 1090 MHz.

Lunghezza d'onda

La distanza tra due creste successive di un'onda: c / f , 27,5 cm a 1090 MHz.

PROSSIMO PASSO

Dalla teoria alla pratica: costruisci il ricevitore

Dodici capitoli hanno spiegato un sistema che ora puoi tenere in mano. Il laboratorio pratico li trasforma nel lavoro di un pomeriggio: cosa comprare con 100-150 euro, come montare e posizionare l'antenna, come preparare un Raspberry Pi e installare il feeder Dataero, e come vedere gli aerei che senti comparire sulla mappa in tempo reale, attribuiti alla tua stazione. Lì, per ogni capitolo qui sopra, c'è una misura da fare: l'orizzonte radio confrontato con aerei reali, la legge dell'inverso del quadrato nella colonna dell'intensità del segnale, il ritmo quotidiano del cielo.

Apri il laboratorio pratico <https://radar.dataero.eu/it/learning/workshop>