

FISICA E INFORMATICA - DAI 12 AI 18 ANNI

Decifrare il cielo

La riga esadecimale qui sotto è un messaggio reale, inviato da un aereo reale circa due volte al secondo. In 112 milionesimi di secondo annuncia chi è l'aereo e, nei messaggi che lo accompagnano, dove si trova, a che quota e a che velocità. Questo corso affronta tutto ciò che serve per capirlo: la fisica dell'onda che lo trasporta, la misura del tempo che dà all'aereo la sua posizione, la codifica che lo comprime in 112 bit, la geometria che limita fin dove si può sentire, e il ricevitore che puoi costruire per ascoltarlo con le tue orecchie.

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

INDICE

Che cos'è l'ADS-B, in una pagina

LEZIONE 1 L'onda: la radio come luce invisibile

LEZIONE 2 Tempo e posizione: come fa l'aereo a sapere dove si trova

LEZIONE 3 Il messaggio: 112 bit, e come si intercettano gli errori

LEZIONE 4 La portata: la curvatura della Terra e la legge dell'inverso del quadrato

LEZIONE 5 Antenne e ricevitori: da un'onda di 27 centimetri a un punto sulla mappa

Sfide

PROSSIMO PASSO Costruiscilo

Che cos'è l'ADS-B, in una pagina

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

Un extended squitter così come lo registra un ricevitore: 28 cifre esadecimali, 112 bit. Entro la lezione 3 saprai leggerne ogni campo.

Il controllo del traffico aereo deve sapere dove si trova ogni aereo, di continuo, per tenerli separati: un aereo di linea in crociera percorre 250 m ogni secondo, e le regole di separazione impongono 300 m in verticale o 9 km in orizzontale tra gli aeromobili sotto controllo radar. Per settant'anni il modo per saperlo è stato il radar: una stazione a terra invia un impulso e misura il tempo dell'eco oppure, nella versione migliorata detta secondaria, interroga un transponder a bordo che risponde su 1090 MHz con un'identità e un'altitudine. Il radar ha dei limiti: richiede una potenza enorme, vede ogni aereo solo una volta per ogni rotazione dell'antenna e non può coprire oceani o montagne.

L'ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, rovescia il problema. Ogni aereo moderno ha a bordo un ricevitore di navigazione satellitare e quindi conosce la propria posizione con un margine di pochi metri. L'ADS-B fa semplicemente annunciare quella posizione al transponder dell'aereo, insieme alla sua identità, altitudine e velocità, circa due volte al secondo, su 1090 MHz, a nessuno in particolare. Automatic (automatica) perché niente la avvia; dependent (dipendente) perché l'informazione proviene interamente dagli strumenti dell'aereo stesso; surveillance (sorveglianza) perché il suo scopo è sapere dove sono gli aerei; broadcast (diffusa) perché viene trasmessa in chiaro a chiunque ascolti. Dal 2020 è

obbligatoria per la maggior parte degli aeromobili negli spazi aerei europei e americani. I controllori la usano insieme al radar, gli altri aerei la usano per vedersi a vicenda, e un ricevitore USB da 25 euro sul tetto di una scuola sente esattamente gli stessi messaggi.

Per capire il sistema devi capire cinque cose, e ognuna è una lezione: l'onda elettromagnetica che trasporta il messaggio; la misura del tempo che dà all'aereo la sua posizione, e che permette a una rete di trovare un aereo che non dice dove si trova; il messaggio digitale e il modo in cui se ne intercettano gli errori; la geometria e l'energia che limitano fin dove si può sentire; e l'antenna e il ricevitore che lo ritrasformano in dati. Il racconto completo è nel corso di riferimento: leggi i capitoli 3 e 5 prima della lezione 3 e i capitoli da 6 a 8 prima delle lezioni 4 e 5.

LEZIONE 1

L'onda: la radio come luce invisibile

Il messaggio lascia l'aereo come onda elettromagnetica: campi elettrici e magnetici oscillanti che si propagano nello spazio senza alcun mezzo, alla velocità della luce $c = 3,00 \times 10^8$ m/s. La luce visibile è lo stesso fenomeno a una frequenza più alta; i tuoi occhi rispondono a circa $4\text{--}8 \times 10^{14}$ Hz, mentre l'ADS-B viene trasmesso a $1,09 \times 10^9$ Hz, mezzo milione di volte più in basso. Tra il messaggio dell'aereo e la luce di questo schermo non c'è alcuna differenza di natura, solo di frequenza.

Poiché l'onda viaggia a velocità fissa, la sua frequenza ne determina la lunghezza d'onda. In un secondo l'onda avanza di c metri e compie f cicli, quindi ogni ciclo occupa c / f metri: $c = f \times \lambda$. Per l'ADS-B, $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. L'onda che passa tra un aereo e la tua antenna ha creste distanti 27,5 cm, e nello spettro si colloca tra il segnale di un cellulare (17 cm) e una stazione radio FM (3 m). Disegna tu stesso questo spettro, su un asse logaritmico da 10^6 Hz a 10^{18} Hz, e collocaci la radio FM, l'ADS-B, i cellulari, il Wi-Fi, l'infrarosso, la luce visibile e i raggi X. L'onda dell'aereo sta in mezzo alle cose che hai in tasca.

$$c = f \times \lambda$$

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

Un'onda radio non è un suono. Il suono è un'onda di pressione in un mezzo, che viaggia a 343 m/s nell'aria, a 1.500 m/s nell'acqua, e per niente nel vuoto. La radio è luce: non ha bisogno di un mezzo, ed è così che attraversa il vuoto da un satellite all'aereo, ed è più veloce di un fattore $3,00 \times 10^8 / 343$, circa 875.000. Se un aereo a 30 km di distanza emette un suono e un messaggio nello stesso istante, il messaggio arriva in 100 microsecondi; il suono arriva 87 secondi dopo, quando l'aereo ha già percorso 22 km. Un'onda su una corda ha in comune con la luce le proprietà che contano, una lunghezza d'onda, una frequenza e una velocità fissa, per cui scuotere più in fretta produce onde più corte e non più veloci; ne differisce perché ha bisogno della corda.

Una proprietà dell'onda sarà importante nella lezione 5: la sua polarizzazione. Il campo elettrico oscilla in una direzione precisa, perpendicolare alla direzione di propagazione. Le antenne degli aerei sono verticali, quindi l'onda ADS-B è polarizzata verticalmente, e un'antenna ricevente coricata su un fianco non ne intercetta quasi nulla, come un'onda su una corda scossa in verticale viene fermata da una fessura orizzontale. Prevedi adesso che cosa succederà alla portata del tuo ricevitore se l'antenna è orizzontale; lo verificherai nel progetto.

LEZIONE 2

Tempo e posizione: come fa l'aereo a sapere dove si trova

La posizione in ogni messaggio ADS-B proviene dalla navigazione satellitare, e la navigazione satellitare è una misura di tempo. Una trentina di satelliti per ciascun sistema (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) orbitano a circa 20.200 km, ognuno con un orologio atomico, ognuno trasmettendo un segnale che indica la propria posizione e l'istante esatto della trasmissione. Il ricevitore sull'aereo annota l'istante di arrivo. La differenza, moltiplicata per c , è la distanza da quel satellite; da un satellite esattamente sulla verticale il segnale impiega $20.200 / 300.000 = 0,0673$ s. Una distanza colloca il ricevitore su una sfera attorno a quel satellite; due sfere si intersecano in una circonferenza; tre in due punti, uno dei quali lontano dalla Terra e quindi scartato. Basterebbero tre satelliti se il ricevitore avesse un orologio perfetto. Ha invece un cristallo di quarzo che deriva di qualche microsecondo, e un microsecondo equivale a 300 m di distanza. Così il ricevitore tratta l'errore del proprio orologio come una quarta incognita e usa un quarto satellite: quattro equazioni, quattro incognite (x, y, z e lo scarto dell'orologio), risolte di continuo. Come effetto collaterale, ogni ricevitore satellitare tiene l'ora con una precisione di decine di nanosecondi, ed è su questo che si basa la seconda metà della lezione.

Tieni a mente gli ordini di grandezza: la luce percorre 0,3 m in un nanosecondo e 300 m in un microsecondo. Una posizione precisa a 3 m richiede una misura del tempo precisa a 10 ns. Un satellite il cui orologio andasse avanti di 1 microsecondo sposterebbe ogni ricevitore che lo usa di 300 m lungo la linea verso di esso, ed è per questo che gli orologi dei satelliti vengono corretti da terra più volte al giorno.

L'aereo dispone di due altitudini. La soluzione satellitare fornisce un'altezza geometrica rispetto all'ellissoide di riferimento. Ma l'altitudine che trasmette per il traffico aereo è barometrica: la pressione dell'aria misurata da una presa sulla fusoliera, convertita in altezza tramite l'Atmosfera Standard Internazionale, che assume 1013,25 hPa e 15 gradi C al livello del mare e un gradiente di 6,5 gradi per chilometro. Quando la pressione reale differisce da quella standard, l'altitudine barometrica di ogni aereo è sbagliata della stessa quantità, ed è esattamente ciò che serve alla separazione: due aerei che leggono i livelli di volo 350 e 360 sono distanti 1.000 ft qualunque sia il tempo. Il messaggio di posizione riporta l'altitudine barometrica a passi di 25 piedi; il messaggio di velocità riporta la differenza tra altezza barometrica e geometrica. Se hai un foglio di calcolo, inverti $p = p_0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^{5.255}$ e verifica che a 11.000 m la pressione è di circa 227 hPa, meno di un quarto di quella al livello del mare: l'aria in cui vola un aereo di linea non ti terrebbe cosciente.

Ora rovescia completamente l'idea. Alcuni aerei trasmettono su 1090 MHz senza una posizione: vecchi transponder che rispondono al radar solo con identità e altitudine, o aerei la cui ricezione satellitare è disturbata. Una rete di ricevitori può comunque localizzarli per multilaterazione. Supponi che quattro ricevitori con orologi sincronizzati registrino ciascuno l'istante di arrivo della stessa trasmissione. Un messaggio che ha raggiunto il ricevitore A un microsecondo prima del ricevitore B è stato inviato da un punto più vicino ad A di 300 m rispetto a B, e tutti questi punti formano un iperboloide con A e B come fuochi. Tre coppie indipendenti, ricavate da quattro ricevitori, danno tre iperboloidi, che si intersecano nel punto in cui si trova l'aereo. È il problema dei satelliti con noto e incognito scambiati: lì un ricevitore e quattro trasmettitori noti; qui un trasmettitore e quattro ricevitori noti. In entrambi i casi ciò che si misura è il tempo, e 1 microsecondo equivale a 300 m. I ricevitori sincronizzano i loro orologi a circa 100 ns grazie agli stessi satelliti usati dall'aereo.

Puoi farlo con il suono. Tre persone con cronometri in punti misurati di un campo da gioco; una quarta, nascosta, batte le mani una volta; ciascuna registra il ritardo. Con il suono a 343 m/s, una differenza di 0,1 s corrisponde a 34 m, e un disegno in scala con posizioni di prova, o uno schizzo delle iperboli, trova chi ha battuto le mani. Poi chiediti quale precisione dovrebbero avere i cronometri per fare lo stesso con la radio su 200 km, e capirai perché la rete ha bisogno del tempo atomico.

LEZIONE 3

Il messaggio: 112 bit, e come si intercettano gli errori

Il transponder invia l'ADS-B come extended squitter Mode S: un preambolo di 8 microsecondi, poi 112 bit di dati al ritmo di un bit per microsecondo. Il preambolo è uno schema fisso di quattro impulsi a 0 μ s, 1 μ s, 3,5 μ s e 4,5 μ s, e il suo compito è rispondere a una domanda che forse non avresti pensato di porti: in un canale pieno di rumore e di altri aerei, come fa un ricevitore a sapere che un messaggio è iniziato, e quando comincia ogni bit? Il decodificatore cerca di continuo quello schema e, quando lo vede, sa entrambe le cose. Ogni protocollo digitale che usi, dal Wi-Fi al codice QR, ha un equivalente.

Un trasmettitore può essere acceso o spento; come fa a inviare un 1 o uno 0? L'ADS-B usa la modulazione a posizione d'impulso. Ogni intervallo di un microsecondo dedicato a un bit è diviso a metà: un impulso nella prima metà e silenzio nella seconda è un 1; silenzio e poi un impulso è uno 0. C'è sempre esattamente un impulso per bit. Rifletti sul perché questo sia meglio di «impulso significa 1, nessun impulso significa 0». Il ricevitore non perde mai la sincronizzazione, nemmeno durante una lunga serie di zeri, che nello schema ingenuo sarebbe indistinguibile dal silenzio. E decide ogni bit chiedendosi quale metà era più forte, anziché se un impulso ha superato una soglia fissa, così un segnale debole da 400 km si decodifica in modo affidabile quanto uno forte proveniente dalla verticale.

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



I 112 bit sono disposti come segue, e dovresti saper riprodurre lo schema a memoria. Bit da 1 a 5: il formato di downlink, 17 per l'ADS-B da un transponder. Bit da 6 a 8: un codice di capacità. Bit da 9 a 32: l'indirizzo ICAO a 24 bit, l'identità permanente dell'aereo, assegnata al momento dell'immatricolazione; ne esistono $2^{24} = 16.777.216$, assegnati agli Stati in blocchi, e quello del Belgio va da 448000 a 44FFFF in esadecimale. Bit da 33 a 88: il campo messaggio a 56 bit, i cui primi cinque bit, il type code, dicono che cosa contengono gli altri 51. I type code da 1 a 4 portano il nominativo come otto caratteri da 6 bit, 64 simboli ciascuno. I type code da 9 a 18 portano una posizione in volo: 12 bit di altitudine barometrica a passi di 25 piedi, un indicatore pari/dispari, e 17 bit ciascuno di latitudine e longitudine codificate. Il type code 19 porta la velocità come componenti est-ovest e nord-sud della velocità al suolo, il rateo verticale e la differenza tra altezza barometrica e geometrica. Bit da 89 a 112: la parità a 24 bit. Controlla i calcoli: 12 bit di altitudine a passi di 25 ft coprono 102.400 ft; 17 bit usati ingenuamente su 180 gradi di latitudine darebbero una risoluzione di appena 1,4 km. La posizione è migliore di così grazie al compact position reporting: i 17 bit danno la posizione all'interno di una zona

con una precisione di pochi metri, ma non dicono quale zona, e l'aereo alterna tra due griglie di zone, pari e dispari. Un ricevitore che ha sentito un messaggio di ciascun tipo risolve la zona senza ambiguità e da lì in poi segue l'aereo con messaggi singoli. Più precisione dagli stessi bit, pagata con il tempo.

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

Seziona il messaggio reale in cima a questa pagina. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 è formato da 28 cifre esadecimali, 112 bit. Le prime due cifre, 8D, sono 1000 1101 in binario; i primi cinque bit, 10001, valgono 17, quindi si tratta di ADS-B da un transponder, e i tre successivi, 101, danno la capacità 5. Le sei cifre successive, 4840D6, sono l'indirizzo ICAO, che le tabelle di assegnazione collocano nei Paesi Bassi. La coppia di cifre seguente, 20, inizia con 00100, type code 4, un messaggio di identificazione, e decodificando i caratteri da 6 bit che seguono si ottiene il nominativo KLM1023. Le ultime sei cifre, 576098, sono la parità. Con un foglio di calcolo o poche righe di codice puoi fare tutta la decodifica, e saper guardare una riga esadecimale e dire «un aereo KLM che annuncia il volo 1023» è l'obiettivo di questa lezione.

La parità merita la riflessione più attenta. Sopra un aeroporto trafficato, le trasmissioni di aerei diversi si sovrappongono di continuo su un ricevitore, e singoli impulsi vanno persi nel rumore; prima o poi un decodificatore metterà insieme dei bit sbagliati. Gli ultimi 24 bit sono un controllo di ridondanza ciclico: gli 88 bit del messaggio vengono trattati come un unico lungo numero binario e divisi, in un'aritmetica in cui la sottrazione è l'or esclusivo, per un polinomio generatore fisso di 25 bit; il resto è il CRC. Il ricevitore ripete la divisione sui bit che ha decodificato. Qualsiasi bit invertito, qualsiasi coppia, e qualsiasi raffica di errori lunga fino a 24 bit cambia il resto, e il messaggio viene scartato. Prova a mano un CRC a 4 bit su un messaggio di 8 bit per vedere il meccanismo, poi, se programmi, implementa il vero CRC-24 e verifica che il messaggio d'esempio supera il controllo e che invertire un qualsiasi bit lo fa fallire. Questo è il rilevamento degli errori come lo fa ogni sistema moderno, in un contesto in cui un errore sfuggito potrebbe mettere un aereo fantasma sullo schermo di un controllore.

LEZIONE 4

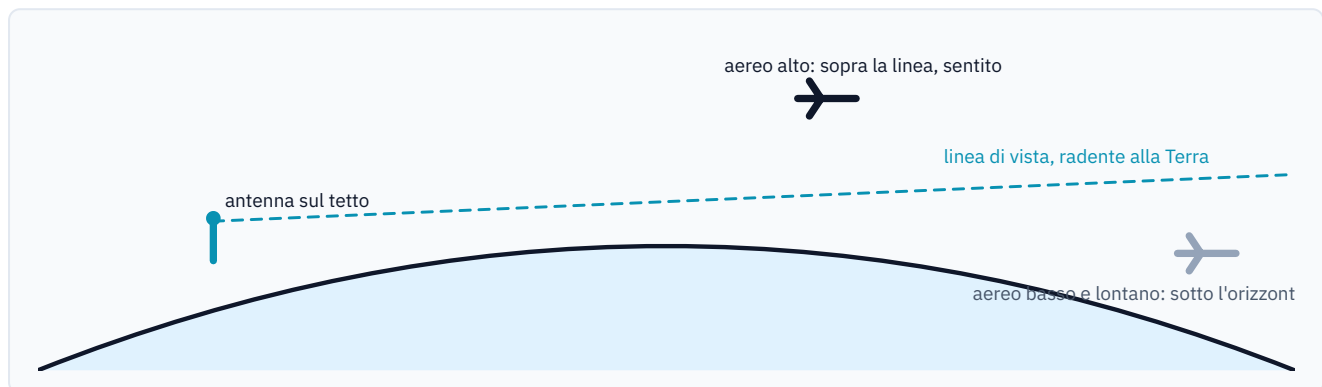
La portata: la curvatura della Terra e la legge dell'inverso del quadrato

Fin dove può sentire un aereo un ricevitore? Valgono due limiti diversi, ed è bene tenerli distinti. Il primo è geometrico. A 1090 MHz la radio non si piega attorno alla Terra; viaggia in linea retta, quindi un ricevitore sente solo gli aerei sopra il suo orizzonte, quelli da cui una linea retta verso l'antenna non tocca il suolo. Ricava la distanza dell'orizzonte. Un'antenna all'altezza h sopra una sfera di raggio R vede un orizzonte nel punto in cui la sua linea di vista è tangente alla sfera; la tangente e i due raggi formano un angolo retto nel punto di tangenza, quindi $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, da cui $d^2 = 2Rh + h^2$, e poiché h è trascurabile rispetto a R , $d = \sqrt{2Rh}$. Con $R = 6.371$ km e h in metri, d (km) = $3,57 \sqrt{h}$. L'atmosfera curva leggermente la radio verso il basso perché il suo indice di rifrazione diminuisce con l'altezza; la

correzione standard tratta la Terra come se avesse quattro terzi del suo raggio reale, sostituendo 3,57 con 4,12. La linea di vista completa da un'antenna a h_1 a un aereo a h_2 è la somma delle due distanze dell'orizzonte:

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

Antenna su un tetto di 20 m, aereo a 11.000 m: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451$ km. Stessa antenna, aereo a 1.000 m: 149 km. Aereo su una pista a 30 km di distanza: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27$ km, quindi muto.



Traccia il grafico di d in funzione di h_2 per l'altezza della tua antenna. La curva è ripida all'inizio e poi si appiattisce, e spiega la forma della copertura di ogni ricevitore: 400 km e oltre per il traffico in crociera, qualche decina di chilometri per gli aerei in avvicinamento, niente a terra tranne che all'aeroporto accanto. Spiega perché l'altezza è la proprietà più importante di un ricevitore, e perché una collina, un edificio o la stessa ala dell'aereo quando vira allontanandosi possono interrompere una traccia all'istante.

Il secondo limite è l'energia. Un transponder irradia qualche centinaio di watt, in modo più o meno uniforme in tutte le direzioni orizzontali. Alla distanza d quella potenza è distribuita su una sfera di area $4\pi d^2$, quindi la potenza intercettata da un'antenna di area efficace fissa diminuisce come $1/d^2$: la legge dell'inverso del quadrato, che dovresti ricavare dall'area della sfera anziché imparare a memoria. Al doppio della distanza, un quarto della potenza; a dieci volte, un centesimo. Gli ingegneri esprimono la perdita in decibel, dove 10 dB sono un fattore dieci in potenza e 3 dB un fattore due, perché i decibel trasformano in somme le moltiplicazioni su molti ordini di grandezza. L'attenuazione in spazio libero tra due antenne semplici è:

$$\text{attenuazione (dB)} = 20 \log_{10}(d \text{ in km}) + 20 \log_{10}(f \text{ in MHz}) + 32.44$$

A 400 km e 1090 MHz: $52,0 + 60,7 + 32,4 = 145$ dB. Un trasmettitore da 250 W corrisponde a +54 dBm; potenza ricevuta $54 - 145 = -91$ dBm, circa 8×10^{-13} W.

Vale la pena soffermarsi su questo numero: un ricevitore su un tetto rileva un segnale $10^{14,5}$ volte più debole di quello partito dall'aereo, un milionesimo di milionesimo di watt. Un buon ricevitore amatoriale decodifica fino a circa -100 dBm, quindi a 400 km restano 9 dB di margine. In altre parole, il limite energetico e l'orizzonte geometrico di un aereo di linea in crociera cadono nello stesso punto, e non per caso: la potenza dei transponder e gli standard dei ricevitori sono stati definiti in modo che un aereo sia udibile fino al proprio orizzonte e non molto oltre, così il canale non viene inondato dal traffico del paese accanto.

Due affinamenti. Effetto Doppler: un aereo che si avvicina a 250 m/s sposta la frequenza ricevuta di $f v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Hz, meno di una parte per milione, cosa di cui un ricevitore non si accorge mai; confrontalo con il suono dello stesso aereo, per cui v / c vale $250 / 343$ e il tono scende di quasi un'ottava mentre passa. E tempo di volo: 400 km alla velocità c richiedono 1,33 ms, quindi la posizione trasmessa è già vecchia di 1,33 ms all'arrivo, e nel frattempo l'aereo si è spostato di 33 cm; trascurabile per una mappa, decisivo per la multilaterazione, che vive proprio di questi microsecondi.

LEZIONE 5

Antenne e ricevitori: da un'onda di 27 centimetri a un punto sulla mappa

Un'antenna è un conduttore in cui un'onda elettromagnetica di passaggio induce una corrente alternata, e lo stesso dispositivo, percorso da una corrente, emette un'onda; antenne riceventi e trasmittenti sono la stessa cosa usata al contrario. La corrente indotta è massima alla risonanza, quando la lunghezza del conduttore permette alla distribuzione di corrente lungo di esso di adattarsi all'oscillazione dell'onda, come una corda della lunghezza giusta risuona con una certa nota. La risonanza fondamentale di un conduttore rettilineo si ha a mezza lunghezza d'onda, 13,75 cm a 1090 MHz, con la corrente massima al centro e nulla alle estremità. L'antenna ADS-B pratica, sugli aerei e sulla maggior parte dei ricevitori, è un monopolo a quarto d'onda: un elemento verticale di 6,9 cm su un piano di massa conduttivo, che lo rispecchia in modo che elemento e immagine insieme formino il dipolo a mezz'onda. Sull'aereo il piano di massa è la fusoliera; un'antenna a 1090 MHz acquistata nasconde la stessa geometria dentro il suo tubo, ripetuta più volte una sopra l'altra. Un'antenna autocostruita viene disaccordata da qualche millimetro di errore e sente solo una frazione del cielo: è per questo che il ricevitore del progetto usa un'antenna tarata in fabbrica.

Un monopolo verticale è più sensibile verso l'orizzonte e per niente lungo il proprio asse; la sua sensibilità in tre dimensioni ha la forma di una ciambella con l'antenna che passa per il buco. Così il tuo ricevitore sentirà perfettamente aerei a 300 km di distanza e ne perderà per qualche secondo uno che passa esattamente sopra di lui, e potrai vederlo succedere. Un'antenna collineare, con diversi elementi risonanti impilati, appiattisce la ciambella e aumenta la sensibilità all'orizzonte a scapito del buco sopra la testa: questo è il guadagno d'antenna, misurato in dBi, e nasce dalla ridistribuzione della sensibilità, mai dalla sua creazione. E, come visto nella lezione 1, l'antenna deve essere verticale, perché l'onda è polarizzata verticalmente.

Tra l'antenna e un punto sulla mappa ci sono quattro stadi. Un filtro passa-banda lascia passare 1090 MHz e respinge i segnali dei cellulari, molto più forti e distanti qualche centinaio di megahertz, che altrimenti saturerebbero tutto ciò che viene dopo. Un amplificatore a basso rumore vicino all'antenna moltiplica il segnale per mille prima del cavo, che a 1090 MHz perde circa 3 dB, metà del segnale, ogni dieci metri; se amplifichi dopo il cavo, amplifichi anche il rumore del cavo. Una radio definita via software, un dispositivo USB da 20 euro venduto in origine come sintonizzatore TV, converte il segnale a una frequenza più bassa e lo campiona due milioni di volte al secondo, trasformandolo in un flusso di numeri. Da qui in poi è programmazione: un software libero scandisce i campioni alla ricerca del preambolo, misura quale metà di ogni intervallo di un microsecondo contiene più energia, mette insieme 112 bit,

calcola il CRC e, se il controllo è superato, decodifica i campi. Un tracker abbina poi i frame di posizione pari e dispari, unisce posizione, velocità e identità in base all'indirizzo ICAO, e mantiene lo stato di ogni aereo finché i messaggi smettono di arrivare, di solito perché è sceso sotto l'orizzonte.

Disegna questa catena, con la grandezza in gioco a ogni stadio: nanovolt all'antenna, microvolt dopo l'amplificatore, due milioni di campioni al secondo in uscita dalla radio, qualche centinaio di frame al secondo in uscita dal decodificatore, un record per aereo in uscita dal tracker. Un punto su una mappa è l'estremità finale di una catena in cui ogni anello è un'idea di questo corso: risonanza, filtraggio, amplificazione, campionamento, riconoscimento di schemi, decodifica, controllo degli errori, aggregazione. Il progetto consiste nel costruire la catena e mettere alla prova il corso con il cielo: misura la tua portata massima in funzione dell'altitudine e confrontala con la formula dell'orizzonte; confronta l'antenna in casa, a una finestra e sul tetto, verticale e orizzontale; registra una giornata di traffico e trova l'ora di punta e la tipica altitudine di crociera; decodifica i messaggi grezzi e verifica il loro CRC con il tuo codice. E poi poniti le domande che il sistema solleva senza rispondere: i messaggi non sono firmati, quindi che cosa impedisce a qualcuno di trasmettere un aereo fantasma; l'aereo dipende da satelliti che possono essere disturbati, quindi che cosa vede il controllore quando succede; e i dati identificano gli aerei, che possono identificare delle persone, quindi chi dovrebbe poter seguire chi.

Sfide

Risolvile prima su carta. La verifica mostra la risposta e il ragionamento.

1. 1. Qual è la lunghezza d'onda del segnale a 1090 MHz, e quanto è lunga un'antenna a quarto d'onda per questo segnale?

2. 2. Quante volte più veloce del suono è il messaggio? Un aereo a 30 km di distanza li emette entrambi nello stesso istante; quanta strada ha fatto quando arriva il suono?

3. 3. L'orologio di un ricevitore sbaglia di 2 microsecondi. Che errore di distanza provoca, e perché un ricevitore satellitare ha bisogno di quattro satelliti anziché tre?

4. 4. Quanti aerei possono identificare 24 bit di indirizzo? Quanto dura un messaggio di 112 bit a 1 bit per microsecondo, e quanto l'intera trasmissione con il suo preambolo?

5. 5. Nel messaggio 8D4840D6..., quali sono il formato di downlink e la capacità, e qual è l'indirizzo ICAO?

6. 6. Un'antenna ricevente si trova a 15 m d'altezza. Qual è l'orizzonte radio per un aereo a 9.000 m, e per uno a 300 m?

7. 7. Perché raddoppiando la distanza la potenza ricevuta si riduce a un quarto? Qual è l'attenuazione a 200 km, e come si confronta con i 145 dB a 400 km?

8. 8. Prevedi che cosa succede alla portata se l'antenna viene messa in orizzontale, e se il ricevitore viene spostato dal tetto al piano terra.

PROSSIMO PASSO

Costruiscilo

Tutto ciò che c'è in queste lezioni si può verificare da una finestra. Il laboratorio pratico ti dà la lista della spesa (da 100 a 150 euro circa, oppure un Raspberry Pi che hai già), l'antenna da scegliere e dove metterla, i tre comandi che installano il feeder Dataero e le misure che mettono alla prova le formule con aerei reali: l'orizzonte radio, la legge dell'inverso del quadrato, il ritmo quotidiano. Quando il tuo ricevitore alimenta la mappa, ogni aereo che sente viene disegnato per tutti, con il nome della tua stazione.

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

Soluzioni

1. 1. Qual è la lunghezza d'onda del segnale a 1090 MHz, e quanto è lunga un'antenna a quarto d'onda per questo segnale?
 $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275 \text{ m}$. Un elemento a quarto d'onda misura 6,9 cm. La velocità fissa della luce costringe frequenza e lunghezza d'onda a essere inversamente proporzionali.
2. 2. Quante volte più veloce del suono è il messaggio? Un aereo a 30 km di distanza li emette entrambi nello stesso istante; quanta strada ha fatto quando arriva il suono?
 $3,00 \times 10^8 / 343 = \text{circa } 875.000 \text{ volte}$. Il messaggio arriva in 100 microsecondi, il suono in 87 s, durante i quali l'aereo a 250 m/s percorre 22 km.
3. 3. L'orologio di un ricevitore sbaglia di 2 microsecondi. Che errore di distanza provoca, e perché un ricevitore satellitare ha bisogno di quattro satelliti anziché tre?
 $2 \times 10^{-6} \text{ s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 600 \text{ m}$. Tre satelliti determinano x, y e z solo se l'orologio è perfetto; lo scarto dell'orologio è una quarta incognita, quindi serve un quarto satellite.
4. 4. Quanti aerei possono identificare 24 bit di indirizzo? Quanto dura un messaggio di 112 bit a 1 bit per microsecondo, e quanto l'intera trasmissione con il suo preambolo?
 $2^{24} = 16.777.216$. I dati durano 112 microsecondi; con il preambolo di 8 microsecondi, 120 microsecondi.
5. 5. Nel messaggio 8D4840D6..., quali sono il formato di downlink e la capacità, e qual è l'indirizzo ICAO?
8D = 1000 1101. I primi cinque bit 10001 = 17: DF 17, ADS-B da un transponder Mode S. I tre bit successivi 101 = 5: CA 5. L'indirizzo ICAO è 4840D6, assegnato ai Paesi Bassi.
6. 6. Un'antenna ricevente si trova a 15 m d'altezza. Qual è l'orizzonte radio per un aereo a 9.000 m, e per uno a 300 m?
 $d = 4,12 \times (\sqrt{15} + \sqrt{9000}) = 4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407 \text{ km}$. Per 300 m: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87 \text{ km}$.
7. 7. Perché raddoppiando la distanza la potenza ricevuta si riduce a un quarto? Qual è l'attenuazione a 200 km, e come si confronta con i 145 dB a 400 km?
La potenza trasmessa si distribuisce su una sfera di area $4 \pi d^2$, che al doppio della distanza è quattro volte più grande. A 200 km: $20 \log_{10}(200) + 20 \log_{10}(1090) + 32,44 = 46,0 + 60,7 + 32,4 = 139 \text{ dB}$, cioè 6 dB (un fattore quattro) in meno che a 400 km.
8. 8. Prevedi che cosa succede alla portata se l'antenna viene messa in orizzontale, e se il ricevitore viene spostato dal tetto al piano terra.
In orizzontale: l'antenna ha polarizzazione incrociata rispetto all'onda verticale; la corrente indotta dipende dalla componente del campo lungo il conduttore, quindi sente pochissimo. Al piano terra: il termine dell'orizzonte $4,12 \sqrt{h1}$ si riduce e gli edifici bloccano la linea di vista, quindi la portata cala bruscamente, soprattutto per gli aerei bassi.