

DAI 12 AI 18 ANNI - PER L'INSEGNANTE

Decifrare il cielo: fisica e informatica attraverso un sistema reale

Cinque lezioni e un progetto. Ogni lezione prende una parte dell'ADS-B e sviluppa per intero la fisica o l'informatica che ci sta dietro: le dimostrazioni dove la classe è in grado di seguirle, esempi svolti con numeri reali, gli esperimenti che rendono osservabile l'idea e i punti in cui l'intuizione degli studenti sbaglia. I più giovani della fascia (12-14 anni) seguono le idee e i calcoli; i più grandi (15-18 anni) seguono le dimostrazioni e realizzano il progetto.

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

INDICE

Prima di cominciare: perché un sistema reale vale cinque lezioni

LEZIONE 1 - FISICA Onde e spettro elettromagnetico: su che cosa viaggia il messaggio

LEZIONE 2 - FISICA E MATEMATICA Tempo e posizione: come l'aereo sa dove si trova, e come una rete trova quello che non lo dice

LEZIONE 3 - INFORMATICA Il messaggio digitale: 112 bit, come vengono inviati e come si scoprono gli errori

LEZIONE 4 - FISICA Propagazione e portata: la curvatura della Terra e la legge dell'inverso del quadrato

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

PROGETTO - DA DUE A QUATTRO

SETTIMANE Costruire un ricevitore e mettere alla prova la fisica con il cielo

Soluzioni delle sfide per gli studenti

PROSSIMO PASSO Il progetto, passo dopo passo

Prima di cominciare: perché un sistema reale vale cinque lezioni

Gran parte della fisica insegnata tra i 12 e i 18 anni arriva a pezzi: un'unità sulle onde qui, una sullo spettro elettromagnetico là, un argomento sui dati digitali in informatica, un accenno ai satelliti in geografia. L'ADS-B è un unico sistema funzionante in cui tutti questi pezzi reggono la struttura contemporaneamente, e di cui la classe può osservare il risultato con un ricevitore che costa meno di un libro di testo. Un aereo determina la propria posizione cronometrando i segnali radio dei satelliti: trilaterazione e velocità della luce. Codifica il risultato in 112 bit con un controllo di ridondanza ciclico: codifica binaria e rilevamento degli errori. Li trasmette come un'onda radio a 1090 MHz modulata in posizione d'impulso: spettro, frequenza e lunghezza d'onda. L'onda raggiunge un ricevitore solo lungo una linea retta che superi la curvatura della Terra, e arriva indebolita secondo l'inverso del quadrato della distanza: geometria ed energia. Un'antenna accordata a un quarto di lunghezza d'onda la converte in corrente: risonanza. E una rete di ricevitori può localizzare perfino un trasmettitore silenzioso a partire dalle differenze dei tempi di arrivo: il problema dei satelliti rovesciato. Ciascuna delle lezioni che seguono prende uno di questi temi e lo sviluppa per sé, con l'ADS-B come esempio conduttore e non come decorazione.

Il corso di riferimento nella pagina principale presenta l'intero sistema in forma narrativa; la classe dovrebbe leggerne i capitoli 3 e 5 prima della lezione 3 e i capitoli da 6 a 8 prima delle lezioni 4 e 5, e il suo glossario è un'ottima dispensa. Questa pagina presuppone che tu l'abbia letto e si concentra sulla fisica e sulla didattica. Le convenzioni numeriche sono le stesse dall'inizio alla fine: $c = 3,00 \times 10^8$ m/s, $f = 1090$ MHz, altezze in metri, distanze in chilometri, e l'aereo in crociera considerato a 11.000 m (livello di volo 360) e 250 m/s, salvo diversa indicazione nell'esempio.

Due avvertenze sull'intuizione. Gli studenti arrivano convinti che le onde radio siano una specie di suono e che siano il "radar" o i "satelliti" a vedere gli aerei. Sono due errori, entrambi affrontati esplicitamente nelle lezioni 1 e 2, ed entrambi ricompariranno; il corso è pensato in modo che ogni lezione successiva ti dia un nuovo motivo per correggerli. Inoltre, gli studenti a proprio agio con le formule spesso non lo sono con gli ordini di grandezza: il corso insiste molto sul chiedere "quanto è grande?" a ogni passaggio, perché 300 m al microsecondo, 145 dB di attenuazione di tratta e 2^{24} indirizzi sono proprio il tipo di numeri che rendono la fisica concreta.

LEZIONE 1 - FISICA

Onde e spettro elettromagnetico: su che cosa viaggia il messaggio

Parti dall'osservazione su cui poggia l'intero corso: il messaggio radio di un aereo e un raggio di luce sono lo stesso fenomeno fisico. Entrambi sono onde elettromagnetiche, campi elettrici e magnetici oscillanti che si propagano nello spazio senza bisogno di alcun mezzo, a una velocità c che nel vuoto è la stessa per ogni frequenza e nell'aria quasi: 299.792.458 m/s, che la classe può arrotondare a $3,00 \times 10^8$ m/s. L'unica grandezza che distingue la radio dalla luce visibile, e la luce visibile dai raggi X, è la frequenza f dell'oscillazione. La nostra retina risponde a frequenze comprese tra circa 4×10^{14} e 8×10^{14} Hz, che percepiamo dal rosso al violetto; l'ADS-B è trasmesso a $1,09 \times 10^9$ Hz, circa mezzo milione di volte più in basso. L'onda non ha nulla di diverso per natura: sono solo i nostri occhi a essere selettivi.

Ricava l'equazione dell'onda con la classe invece di enunciarla. Se un'onda viaggia a velocità c e oscilla f volte al secondo, in un secondo è avanzata di una distanza c e ha prodotto f cicli completi; ogni ciclo occupa quindi una lunghezza c / f . Quella lunghezza è la lunghezza d'onda, λ , e dunque $c = f \times \lambda$. Applicata all'ADS-B: $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. Il messaggio tra l'aereo e il ricevitore ha creste distanti 27,5 cm. Fai collocare questo valore alla classe su uno spettro disegnato da loro stessi, su un asse logaritmico: la radio FM a 100 MHz e 3 m, l'ADS-B a 1090 MHz e 27,5 cm, i cellulari a 1800 MHz e 17 cm, il Wi-Fi e i forni a microonde a 2450 MHz e 12 cm, l'infrarosso, la luce visibile a $5,6 \times 10^{14}$ Hz e 540 nm, e così via fino ai raggi X. L'esercizio di collocare l'onda dell'aereo tra un telefono e un forno vale più di qualunque tabella, perché fa capire che sono vicini di casa.

Ora affronta di petto la confusione con il suono, perché è universale e perché il confronto insegna entrambi i fenomeni. Il suono è un'onda di pressione longitudinale in un mezzo; la sua velocità è una proprietà del mezzo: 343 m/s nell'aria a 20 gradi, circa 1500 m/s nell'acqua, zero nel vuoto. La radio è un'onda elettromagnetica trasversale che non ha bisogno di alcun mezzo, e viaggia a c nel vuoto e in modo appena più lento nell'aria. Dai un numero alla differenza: $3,00 \times 10^8$ diviso 343 fa circa 875.000. Un aereo a 30 km che emette un suono e un messaggio nello stesso istante consegna il messaggio in 100 microsecondi e il suono in 87 secondi; quando arriva il suono, l'aereo ha percorso 22 km. L'esperimento è una corda in classe e una torcia attraverso il campo sportivo: un'onda sulla corda ha visibilmente bisogno della corda e viaggia a una velocità imposta dalla corda, mentre il lampo di una

torcia raggiunge l'altra estremità senza un ritardo misurabile da nessuno. Elenca esplicitamente che cosa la corda ha in comune con la luce (un'onda, una lunghezza d'onda, una frequenza, una velocità fissa e quindi una relazione inversa tra f e λ) e che cosa no (un mezzo, una velocità di metri al secondo).

Concludi con la polarizzazione, che costa poco da mostrare e torna utile nella lezione 5. Il campo elettrico di un'onda elettromagnetica oscilla in una direzione precisa, perpendicolare a quella di propagazione. Le antenne dei transponder degli aerei sono verticali, quindi l'onda ADS-B è polarizzata verticalmente; anche l'antenna ricevente deve essere verticale, e messa in orizzontale non sente quasi nulla. Un'onda su una corda scossa in verticale passa attraverso una fessura verticale in una scatola di cartone ed è bloccata da una orizzontale; due pezzi di pellicola polarizzatrice (da un paio di occhiali 3D economici) incrociati davanti a una finestra mostrano la stessa cosa per la luce. Chiedi alla classe di prevedere che cosa succede alla ricezione se un'antenna ricevente viene posata in orizzontale. Verificheranno la previsione nel progetto.

Esercizio svolto da assegnare

Il secondo sistema ADS-B, usato dagli aerei leggeri negli Stati Uniti, trasmette a 978 MHz. Qual è la sua lunghezza d'onda, e quanto sarebbe lunga un'antenna a quarto d'onda per questo sistema? (0,307 m; 7,7 cm.) Uno studente che sa risolverlo ha capito la lezione 1.

LEZIONE 2 - FISICA E MATEMATICA

Tempo e posizione: come l'aereo sa dove si trova, e come una rete trova quello che non lo dice

Tutto ciò che l'aereo trasmette sulla propria posizione proviene dalla navigazione satellitare, e la navigazione satellitare è, in fondo, una misura di tempo. Ogni satellite GNSS, in orbita a circa 20.200 km, porta a bordo un orologio atomico e trasmette un segnale che indica la propria posizione e l'istante esatto di trasmissione. Il ricevitore annota l'istante di arrivo. La differenza, moltiplicata per c , è la distanza da quel satellite, e una sola distanza di questo tipo colloca il ricevitore su una sfera di quel raggio centrata sul satellite. Lascia che la classe ricavi da sé il conteggio: due sfere si intersecano in una circonferenza, tre in due punti, uno dei quali è lontano dalla superficie terrestre e può essere scartato. Tre satelliti bastano quindi, a patto di avere un orologio perfetto nel ricevitore. Non è affatto così: un oscillatore al quarzo deriva ben oltre i nanosecondi richiesti. La soluzione, che è il cuore elegante dell'argomento, consiste nel trattare l'errore dell'orologio del ricevitore come una quarta incognita e usare un quarto satellite: quattro equazioni in quattro incognite (x , y , z e lo scarto dell'orologio), risolte di continuo. Un ricevitore GNSS ha quindi bisogno di quattro satelliti in vista e, come effetto collaterale, mantiene l'ora con una precisione di qualche decina di nanosecondi; per questo i ricevitori della rete della lezione 5 usano, per i loro orologi, gli stessi satelliti degli aerei.

Scrivi gli ordini di grandezza alla lavagna e tornaci sopra spesso. La luce percorre 0,300 m in un nanosecondo e 300 m in un microsecondo. Un errore di tempo di 1 microsecondo è un errore di distanza di 300 m; la precisione di pochi metri di un ricevitore moderno corrisponde a una misura del tempo dell'ordine di dieci nanosecondi. Il tempo di percorrenza da un satellite esattamente sulla verticale è $20.200 \text{ km} / 3,00 \times 10^5 \text{ km/s} = 0,0673 \text{ s}$, e da uno vicino all'orizzonte circa 0,086 s: il ricevitore misura quindi differenze di pochi millisecondi con una precisione di un centomilionesimo di quel valore. Chiedi alla classe che cosa succederebbe se l'orologio di un satellite fosse avanti di un microsecondo;

dovrebbero capire che ogni ricevitore che lo usa verrebbe spostato di circa 300 m lungo la linea che lo congiunge al satellite, ed è per questo che gli orologi dei satelliti vengono corretti da terra più volte al giorno.

Distingui le due altitudini, perché il messaggio le contiene entrambe e gli studenti lo chiedono sempre. La soluzione satellitare fornisce un'altezza geometrica rispetto all'ellissoide di riferimento terrestre. Gli aerei comunicano invece l'altitudine barometrica: la pressione statica all'esterno della fusoliera convertita in quota attraverso l'Atmosfera Standard Internazionale (ISA), che assume 1013,25 hPa e 15 gradi al livello del mare e una diminuzione di 6,5 gradi per chilometro. In un giorno in cui la pressione reale differisce da quella standard, l'altitudine barometrica di tutti gli aerei è sbagliata della stessa quantità, ed è esattamente ciò che serve per la separazione: due aerei che leggono i livelli di volo 350 e 360 sono distanti 1000 ft qualunque sia il tempo. I messaggi di posizione ADS-B contengono l'altitudine barometrica a passi di 25 piedi; il messaggio di velocità contiene la differenza tra altezza barometrica e geometrica, così un ricevitore può ricavarle entrambe. Per il gruppo dei più grandi, la relazione $ISA\ p = p_0 (1 - 0,0065\ h / 288,15)^{5,255}$ è un ottimo esercizio con il foglio di calcolo: invertila per trovare h a partire da p e verifica che a 11.000 m corrispondono circa 227 hPa, un quinto della pressione al livello del mare.

Ora rovescia il problema. Alcuni aerei trasmettono a 1090 MHz senza una posizione satellitare: vecchi transponder che rispondono al radar solo con identità e altitudine, oppure aerei il cui GNSS è disturbato. Una rete di ricevitori può comunque localizzarli. Supponi che quattro ricevitori con orologi sincronizzati registrino l'istante di arrivo della stessa trasmissione. Il trasmettitore è ignoto, i ricevitori sono noti: è il problema del GNSS con i ruoli di noto e ignoto scambiati. Un messaggio arrivato al ricevitore A un microsecondo prima che al ricevitore B è stato emesso da un punto 300 m più vicino ad A che a B, e il luogo di tali punti è un iperboloide con A e B come fuochi. Tre coppie indipendenti tratte da quattro ricevitori danno tre iperboloidi, la cui intersezione è l'aereo. Questa è la multilaterazione, e richiede che gli orologi dei ricevitori concordino entro circa 100 ns, precisione che ottengono dai satelliti. Per la classe, riducila a due dimensioni con l'esercizio in cortile: tre studenti con il cronometro in punti misurati, un quarto nascosto da qualche parte batte le mani, i tre registrano i ritardi corretti del tempo di reazione e la classe traccia le iperboli (o, più semplicemente, prova posizioni diverse su un disegno in scala) per trovare chi ha battuto le mani, usando 343 m/s. Poi chiedi quale precisione nella misura del tempo servirebbe per fare lo stesso con la radio su 200 km, e lascia che sentano la distanza tra un cronometro e un orologio atomico.

Esercizio svolto da assegnare

Due ricevitori distanti 60 km registrano un messaggio a 50 microsecondi l'uno dall'altro. Di quanto era più vicino l'aereo al primo ricevitore? (15 km.) Se gli orologi fossero sfasati tra loro di 1 microsecondo, quale errore introdurrebbe nella risposta? (300 m.) Uno studente che sa spiegare perché la seconda risposta non dipende dalla distanza ha capito che cosa richiede la multilaterazione.

LEZIONE 3 - INFORMATICA

Il messaggio digitale: 112 bit, come vengono inviati e come si

scoprono gli errori

Il transponder dell'aereo invia i dati ADS-B come squitter esteso Mode S: un preambolo di 8 microsecondi seguito da 112 bit di dati, esattamente un bit per microsecondo. Comincia la lezione dal preambolo, perché risponde a una domanda che gli studenti non hanno ancora pensato di porsi: come fa un ricevitore a sapere che un messaggio è iniziato, quando il canale è pieno di rumore e di altri aerei? Il preambolo è una sequenza fissa di quattro impulsi a 0, 1, 3,5 e 4,5 microsecondi. Un decodificatore cerca continuamente questa sequenza; quando la trova, sa sia che segue un messaggio sia l'istante preciso in cui inizia ciascuna casella di bit. Ogni protocollo digitale che gli studenti hanno incontrato, dal Wi-Fi al codice QR, ha un equivalente, ed è un buon momento per farlo notare.

Poi la modulazione. Una radio può essere accesa o spenta: come si invia un 1 o uno 0? L'ADS-B usa la modulazione a posizione d'impulso (PPM): ogni casella di bit di un microsecondo è divisa in due metà, e un impulso nella prima metà seguito da silenzio significa 1, silenzio seguito da un impulso significa 0. Disegna alla lavagna qualche bit sotto forma di impulsi e falli leggere alla classe. Poi chiedi perché questo sia meglio dello schema ovvio "impulso significa 1, nessun impulso significa 0". Con un piccolo aiuto emergono due ragioni. C'è sempre esattamente un impulso per bit, quindi il ricevitore può mantenere agganciata la temporizzazione anche durante una lunga serie di zeri, e può decidere ogni bit chiedendosi quale metà fosse più forte invece che se un impulso abbia superato una soglia assoluta, il che rende la decodifica indipendente dall'intensità del segnale. Nello schema ingenuo una lunga serie di zeri sarebbe indistinguibile dal silenzio; in PPM è un battito regolare di impulsi nella seconda metà.

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



Ogni casella dura 1 microsecondo. Impulso nella prima metà: 1. Impulso nella seconda metà: 0.

Ora la struttura dei 112 bit, che alla fine della lezione la classe dovrebbe saper riprodurre a memoria. I bit da 1 a 5 sono il formato di downlink, 17 per l'ADS-B emesso da un transponder. I bit da 6 a 8 sono un codice di capacità. I bit da 9 a 32 sono l'indirizzo ICAO a 24 bit, l'identità permanente dell'aereo. I bit da 33 a 88 sono il campo messaggio a 56 bit, i cui primi cinque bit, il type code, dicono che cosa contengono i restanti 51: un messaggio di identificazione (type code da 1 a 4) contiene il nominativo di otto caratteri come otto caratteri da 6 bit; una posizione in volo (da 9 a 18) contiene 12 bit di altitudine barometrica, un indicatore che dice se il frame è pari o dispari, e 17 bit ciascuno di latitudine e longitudine codificate; un messaggio di velocità (19) contiene le componenti est-ovest e nord-sud della velocità al suolo, il rateo verticale e la differenza tra altezza barometrica e geometrica. I bit da 89 a 112 sono la parità a 24 bit. Proponi i calcoli: 24 bit di indirizzo danno $2^{24} = 16.777.216$ aerei; otto caratteri da 6 bit permettono 64 simboli ciascuno, abbastanza per lettere, cifre e spazio; 12 bit di altitudine a passi di 25 piedi coprono 102.400 piedi; e 17 bit di latitudine, usati in modo ingenuo su 180 gradi, avrebbero una risoluzione di appena 1,4 km, il che solleva la domanda a cui risponde la codifica compatta della posizione (CPR). Spiega la CPR in un paragrafo: i 17 bit danno la posizione all'interno di una zona con la precisione di

pochi metri, ma non dicono quale zona; l'aereo alterna due griglie di zone, pari e dispari, e un ricevitore che ha un frame di ciascun tipo può individuare la zona senza ambiguità e poi seguire l'aereo con singoli messaggi. È un bell'esempio di come ottenere più precisione dagli stessi bit sfruttando il tempo.

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

Dai alla classe un messaggio reale e lasciatglielo sezionare. La stringa esadecimale 8D4840D6202CC371C32CE0576098 è composta da 28 cifre esadecimali, cioè 112 bit. Convertendo in binario le prime due cifre, 8D, si ottiene 10001 101: DF = 17, CA = 5. Le sei cifre successive, 4840D6, sono l'indirizzo ICAO, che le tabelle di assegnazione attribuiscono ai Paesi Bassi. Le cifre seguenti, 20 ..., iniziano 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. Una classe con un foglio di calcolo o poche righe di Python può svolgere l'intera decodifica in una lezione, e l'obiettivo da raggiungere è saper prendere una stringa esadecimale e dire "questo è un aereo KLM che annuncia il suo numero di volo".

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: formato di downlink 17, capacità 5. 4840D6: indirizzo ICAO, assegnato ai Paesi Bassi. 20...: type code 4, identificazione, nominativo KLM1023. 576098: la parità a 24 bit.

Chiudi con la parità, perché è l'idea informatica che più merita di essere sviluppata. Sopra un aeroporto trafficato, i messaggi di aerei diversi si sovrappongono di continuo al ricevitore, e degli impulsi vanno persi nel rumore; un decodificatore finirà inevitabilmente per assemblare bit sbagliati. Il campo da 24 bit alla fine è un controllo di ridondanza ciclico: gli 88 bit del messaggio vengono trattati come un lungo numero binario e divisi, in un'aritmetica speciale in cui la sottrazione è l'or esclusivo (XOR), per un generatore fisso da 25 bit; il resto è il CRC. Il ricevitore ripete la divisione sui bit che ha decodificato e confronta. Qualsiasi bit singolo alterato, qualsiasi coppia, e qualsiasi raffica di errori lunga fino a 24 bit cambia il resto, quindi il messaggio corrotto viene scartato. Mostra l'idea in piccolo con un CRC da 4 bit su un messaggio da 8 bit fatto a mano, o con l'analogo più semplice della cifra di controllo di un codice a barre; poi fai implementare al gruppo dei più grandi il vero CRC-24 in poche righe di codice e verificare che la parità del messaggio d'esempio risulti corretta e che invertire un solo bit lo faccia fallire. È il rilevamento degli errori come lo fa ogni sistema moderno, incontrato in un contesto in cui un errore sfuggito potrebbe far comparire un aereo fantasma sullo schermo di un controllore.

Esercizio svolto da assegnare

Quanto dura una trasmissione completa e, se un transponder invia 4,5 squitter estesi al secondo, per quale frazione del tempo trasmette ADS-B? (120 microsecondi; 540 microsecondi al secondo, lo 0,054 per cento.) Quanti aerei potrebbero in teoria condividere il canale prima che fosse occupato senza interruzione, ignorando tutto il resto che vi viene trasmesso? (Circa 1850, ed è per questo che la congestione negli spazi aerei più trafficati è un vero problema ingegneristico.)

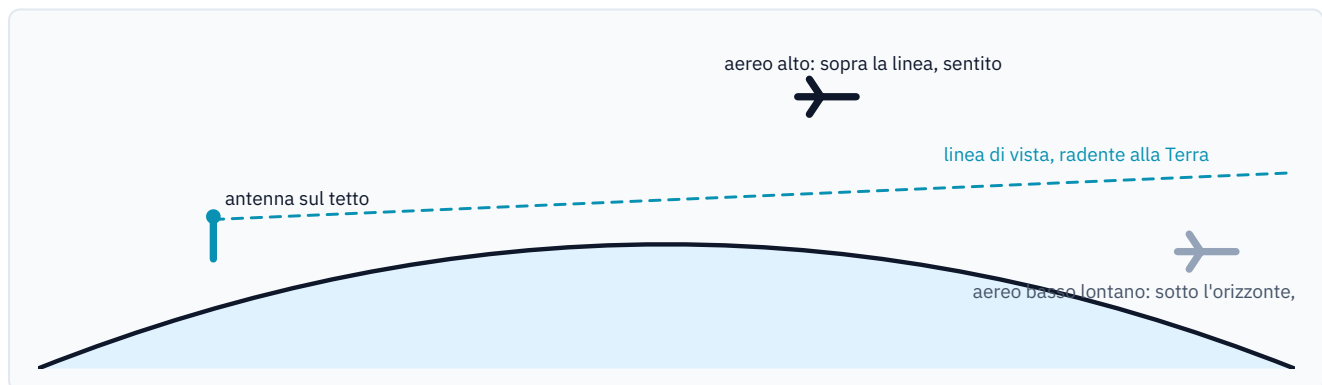
LEZIONE 4 - FISICA

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

Da quale distanza un ricevitore riesce a sentire un aereo? La domanda ha due risposte indipendenti, una geometrica e una energetica, e lo scopo della lezione è ricavarle entrambe e scoprire che i progettisti hanno fatto in modo che coincidano. Comincia dalla geometria. A 1090 MHz la radio non si diffrange in modo utile attorno alla Terra: si comporta come la luce e viaggia in linea retta. Un ricevitore può quindi sentire solo gli aerei sopra il proprio orizzonte, cioè quelli da cui una linea retta verso l'antenna non attraversa il terreno. Ricava con la classe la distanza dell'orizzonte. Un'antenna ad altezza h sopra una sfera di raggio R vede l'orizzonte dove la sua linea di vista è tangente alla sfera. La tangente, il raggio verso il punto di tangenza e il raggio verso l'antenna formano un angolo retto nel punto di tangenza, quindi per Pitagora $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, da cui $d^2 = 2Rh + h^2$. Poiché h è minuscolo rispetto a R , $d = \sqrt{2Rh}$. Con $R = 6371$ km e h in metri, d in chilometri $= \sqrt{2 \times 6371 \times h / 1000} = 3,57 \sqrt{h}$. La densità dell'atmosfera, e con essa il suo indice di rifrazione, diminuisce con la quota, il che curva leggermente verso il basso i raggi radio; la correzione standard tratta la Terra come se avesse un raggio pari a quattro terzi di quello reale, sostituendo 3,57 con 4,12. La linea di vista completa da un'antenna ad altezza h_1 a un aereo a quota 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 a 20 m, aereo a 11.000 m: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451$ km. Stessa antenna, aereo a 1000 m: $4,12 \times (4,47 + 31,6) = 149$ km. Aereo sulla pista a 30 km di distanza: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27$ km, quindi non viene sentito.



Fai tracciare alla classe d in funzione di h_2 per l'altezza dell'antenna della propria scuola; la curva, ripida all'inizio e poi sempre più piatta, spiega la forma della copertura di ogni ricevitore: un cerchio di 400 km e oltre per il traffico in crociera, qualche decina di chilometri per gli aerei in avvicinamento, e niente al suolo, se non nell'aeroporto accanto. Spiega anche perché l'altezza conta più di qualunque altra caratteristica di un ricevitore, e perché una collina tra te e l'aeroporto, o l'ala stessa dell'aereo quando vira allontanandosi, interrompe di colpo una traccia. L'esperimento in cortile del corso per la scuola primaria, vedere più lontano in piedi su una panchina che accovacciati, non è troppo banale per questa fascia d'età se lo fai seguire dalla dimostrazione: il punto è che ora sanno perché.

Ora l'energia. Un transponder irradia una potenza di picco di qualche centinaio di watt, in modo pressoché uniforme in tutte le direzioni orizzontali. A una distanza d quella potenza si 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 la classe dovrebbe ricavare dall'area della sfera invece di impararla a memoria. Distanza doppia, un quarto della potenza; distanza dieci volte maggiore, un centesimo. I radioingegneri esprimono in decibel l'attenuazione tra un trasmettitore isotropo e un ricevitore isotropo, e la formula standard, che il gruppo dei più grandi può accettare sulla fiducia o ricavare dall'area efficace di un'antenna, $\lambda^2 / 4\pi$, è:

$$\text{attenuazione di tratta (dB)} = 20 \log_{10}(d \text{ in km}) + 20 \log_{10}(f \text{ in MHz}) + 32,44$$

A 400 km e 1090 MHz: $20 \times 2,60 + 20 \times 3,04 + 32,44 = 52,0 + 60,7 + 32,4 = 145$ dB. Un trasmettitore da 250 W corrisponde a +54 dBm; la potenza ricevuta è $54 - 145 = -91$ dBm, circa 8×10^{-13} W, ovvero un milionesimo di milionesimo di watt.

Dedica qualche minuto ai decibel se la classe non li ha ancora incontrati, perché trasformano una moltiplicazione su quattordici ordini di grandezza in un'addizione, e perché il numero in sé è istruttivo: un ricevitore su un tetto rileva un segnale $10^{14,5}$ volte più debole di quello che ha lasciato l'aereo. Un buon ricevitore amatoriale riesce a decodificare fino a circa -100 dBm, quindi a 400 km restano circa 9 dB di margine; in altre parole, per un aereo di linea in crociera il limite energetico e l'orizzonte geometrico cadono nello stesso punto. Non è un caso: la potenza dei transponder e gli standard dei ricevitori sono stati specificati in modo che un aereo sia udibile fino all'orizzonte e non molto oltre, il che evita che il canale sia sommerso dalle trasmissioni del Paese vicino.

Due approfondimenti per il gruppo dei più grandi. Primo, l'effetto Doppler: un aereo che si avvicina a 250 m/s sposta la frequenza ricevuta di $f \times v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Hz, meno di una parte su un milione della portante, cosa di cui un ricevitore non si accorge mai; confrontalo con lo spostamento Doppler udibile del rumore dell'aereo, dove v / c vale $250 / 343$ e il tono cambia di quasi un'ottava al passaggio. Secondo, il tempo di volo del segnale: 400 km alla velocità c richiedono 1,33 ms, quindi la posizione contenuta nel messaggio è già vecchia di 1,33 ms, durante i quali l'aereo si è spostato di 33 cm; trascurabile per una mappa, decisivo per la multilaterazione della lezione 2, che vive proprio di questi microsecondi.

Esercizio svolto da assegnare

Un ricevitore su un palo di 10 m sente un aereo in crociera a 11.000 m ma non un aereo leggero a 600 m che si trova a 130 km. L'aereo leggero è sotto l'orizzonte? (Orizzonte: $4,12 \times (3,16 + 24,5) = 114$ km, quindi sì.) A che altezza dovrebbe trovarsi il ricevitore per sentirlo? (Serve $4,12 \times (\sqrt{h_1} + 24,5) = 130$, quindi $\sqrt{h_1} = 7,05$, $h_1 = 50$ m.)

LEZIONE 5 - FISICA E INGEGNERIA

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

Un'antenna è un conduttore in cui un'onda elettromagnetica che passa induce una corrente alternata; l'antenna ricevente e quella trasmittente sono lo stesso dispositivo usato in versi opposti, una reciprocità che va detta esplicitamente alla classe. La corrente indotta è massima quando il conduttore entra in risonanza: quando la sua lunghezza è tale che la distribuzione della corrente lungo di esso si accorda con l'oscillazione dell'onda, esattamente come una corda della lunghezza giusta risuona con una certa nota o un'altalena con un certo ritmo di spinte. 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, sull'aereo come sulla maggior parte dei ricevitori, è un monopolo a quarto d'onda: un elemento verticale di 6,9 cm montato su un piano di massa conduttore, che lo rispecchia elettricamente in modo che elemento e immagine formino insieme 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 per concentrare la sensibilità verso l'orizzonte. Un modello costruito in classe con un'asta di 6,9 cm su un coperchio di latta mostra la geometria e la lunghezza, misurata con un righello e confrontata con l'onda di 27,5 cm; il ricevitore del progetto, però, usa l'antenna tarata in fabbrica, perché qualche millimetro di errore basta a disaccordare un'antenna autocostruita, che sente allora solo una frazione del cielo.

Sviluppa il diagramma di radiazione, perché prevede qualcosa che la classe può osservare. Un monopolo verticale irradia e riceve con la massima intensità verso l'orizzonte e per nulla lungo il proprio asse; la sua sensibilità, rappresentata in tre dimensioni, è una ciambella con l'antenna che passa nel buco. Così un ricevitore di solito sente perfettamente aerei a 300 km e perde per qualche secondo quello che gli passa esattamente sopra, e la classe può vederlo accadere sul proprio ricevitore. Un'antenna collineare, con più elementi risonanti sovrapposti, schiaccia la ciambella, aumentando la sensibilità all'orizzonte dove si trovano gli aerei lontani, a scapito della ricezione sulla verticale, dove il buco si allarga: questo è il guadagno d'antenna, espresso in dBi, e deriva dal ridistribuire la sensibilità, mai dal crearla. La polarizzazione, vista nella lezione 1, ha ora una conseguenza pratica che il progetto metterà alla prova: l'antenna deve essere verticale.

Tra l'antenna e il computer ci sono tre stadi, ognuno dei quali è una piccola lezione. Un filtro passa-banda lascia passare i 1090 MHz e respinge le trasmissioni dei cellulari, molto più forti e distanti poche centinaia di megahertz, che altrimenti saturerebbero l'amplificatore. Un amplificatore a basso rumore (LNA), posto all'antenna e non al ricevitore, moltiplica il segnale per mille prima che entri nel cavo; l'ordine conta, perché a 1090 MHz un cavo coassiale perde circa metà del segnale, 3 dB, ogni dieci metri, e amplificare dopo la perdita significherebbe amplificare insieme al segnale anche il rumore del cavo. Poi la radio definita via software (SDR): un dispositivo USB da 20 euro nato come sintonizzatore TV, che riporta il segnale in banda base e lo campiona due milioni di volte al secondo trasformandolo in un flusso di numeri. Da quel punto in poi il problema radio diventa un problema di programmazione. Un software libero scandisce il flusso di campioni alla ricerca della sequenza del preambolo, misura quale metà di ogni casella da un microsecondo contiene più energia, assembla 112 bit, calcola il CRC e, se il controllo

va a buon fine, decodifica i campi. Un tracker abbina poi i frame di posizione pari e dispari, unisce posizione, velocità e identificazione in base all'indirizzo ICAO e conserva lo stato di ogni aereo finché i messaggi non smettono di arrivare.

Proponi la catena alla classe come uno schema da disegnare da sé, con la grandezza in gioco a ogni stadio: nanovolt di corrente alternata all'antenna; microvolt dopo l'amplificatore; due milioni di numeri a 8 bit al secondo in uscita dall'SDR; frame da 112 bit in uscita dal decodificatore, forse qualche centinaio al secondo; un record per aereo in uscita dal tracker. Il messaggio da far arrivare è che un punto su una mappa è l'estremità di una catena in cui ogni anello è un'idea che ora comprendono: risonanza, filtraggio, amplificazione, campionamento, riconoscimento di sequenze, decodifica, controllo degli errori, aggregazione.

Esercizio svolto da assegnare

Un cavo perde 3 dB ogni 10 m a 1090 MHz. Quale frazione del segnale perde quindi una tratta di 20 m? (6 dB, tre quarti.) Se il limite del ricevitore è -100 dBm e il segnale all'antenna di un aereo a 400 km è -91 dBm, il segnale può attraversare il cavo senza amplificatore? (Appena: -97 dBm. Basta un'ulteriore perdita, pioggia sui connettori o una tratta più lunga, e l'aereo all'orizzonte scompare. Per questo l'amplificatore va messo all'antenna.)

PROGETTO - DA DUE A QUATTRO SETTIMANE

Costruire un ricevitore e mettere alla prova la fisica con il cielo

Il progetto trasforma le cinque lezioni in misure. L'attrezzatura è una chiavetta USB di radio definita via software (circa 25 euro), un'antenna a 1090 MHz tarata in fabbrica (da 50 a 70 euro), qualche metro di cavo coassiale e un portatile o un Raspberry Pi con uno dei decodificatori gratuiti (dump1090 e i suoi derivati sono lo standard). L'installazione richiede un pomeriggio e in pochi minuti il software mostra una tabella di aerei con indirizzi ICAO, nominativi, posizioni, altitudini e velocità, oltre a una mappa. Tutto il progetto è di sola ricezione: niente trasmette, e la classe deve capire che trasmettere sulle frequenze aeronautiche sarebbe illegale oltre che pericoloso. L'accesso al tetto richiede la consueta autorizzazione della scuola; una finestra a un piano alto rivolta verso i principali flussi di traffico è un ottimo punto di partenza. La pagina Diventa feeder di questo sito illustra passo per passo la stessa installazione e permette al ricevitore della scuola di alimentare la mappa in tempo reale.

La prima indagine riguarda l'orizzonte radio. Per ogni aereo il decodificatore riporta la distanza e l'altitudine a cui è stato sentito l'ultima volta. Nell'arco di una giornata, raccogli la distanza massima a cui sono stati ricevuti gli aerei in diverse fasce di quota e traccia la distanza in funzione dell'altitudine. Gli studenti hanno la formula della lezione 4 e l'altezza dell'antenna: devono prevedere la curva prima di vedere i dati, poi confrontare. L'accordo di solito è buono per gli aerei alti e peggiore per quelli bassi, e la discussione sul perché (edifici, rilievi, il buco dell'antenna sulla verticale, l'ombra dell'aereo stesso) è proprio il tipo di confronto tra teoria e misura che un libro di testo non può offrire. Una mappa degli aerei più lontani sentiti in ogni direzione, che il software disegna, mostra il rilievo dell'intera regione sotto forma di ombre nella copertura.

La seconda riguarda l'antenna. Confronta il numero di messaggi e la portata massima con l'antenna in casa, vicino a una finestra e sul tetto; verticale e posata in orizzontale; appoggiata su una superficie metallica e tenuta lontana da qualsiasi metallo. Ogni confronto verifica un'affermazione precisa delle lezioni 1 e 5, e ogni risultato va previsto prima. La prova della polarizzazione è la più sorprendente: posata in orizzontale, l'antenna perde la maggior parte dei suoi aerei.

La terza riguarda i dati. Registra un'intera giornata di traffico e interrogala: l'ora di punta, la distribuzione delle quote di crociera (gli studenti si aspettano una distribuzione ampia e scoprono che la maggior parte degli aerei di linea vola tra 10.000 e 12.000 m), il rateo di salita delle partenze dall'aeroporto più vicino, gli Stati i cui aerei passano più spesso (in base all'assegnazione degli indirizzi ICAO). Il gruppo dei più grandi può decodificare da sé i messaggi grezzi, partendo dall'esadecimale registrato dal software, e verificare il CRC con il proprio codice. Una classe con un secondo ricevitore in una scuola partner ad almeno 30 chilometri di distanza, entrambi con uscita marcata temporalmente via GNSS, può tentare una multilaterazione bidimensionale di un aereo che entrambi sentono e confrontarla con la posizione trasmessa dall'aereo: il risultato più ambizioso del corso, e tutt'altro che teorico.

Concludi con le domande che il sistema solleva senza rispondervi. I messaggi non sono firmati, quindi un trasmettitore potrebbe diffondere un aereo fantasma: che cosa protegge il sistema, e quanto costerebbe una versione firmata? L'aereo dipende da satelliti che possono essere disturbati: che cosa succede al quadro del traffico di un controllore quando accade? I dati identificano gli aerei, e un aereo può identificare una persona: chi dovrebbe poter seguire chi? Una classe che ha costruito il ricevitore si è guadagnata queste domande, che sono un ottimo tema finale o argomento di dibattito.

Soluzioni delle sfide per gli studenti

La pagina per gli studenti propone otto sfide, una o due per lezione, utilizzabili come compiti a casa o come verifica di fine corso. Ecco le soluzioni, con il ragionamento che una risposta da punteggio pieno dovrebbe contenere:

1. Lunghezza d'onda a 1090 MHz: $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. Elemento a quarto d'onda: 6,9 cm. Ragionamento: $c = f \times \lambda$, e la velocità fissa della luce impone una relazione inversa.
2. La luce è più veloce del suono di $3,00 \times 10^8 / 343$, cioè circa 875.000 volte. Su 30 km il messaggio impiega 100 microsecondi e il suono 87 s; in quel tempo l'aereo, a 250 m/s, percorre 22 km.
3. Un errore dell'orologio di 2 microsecondi dà un errore di distanza di $2 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 = 600$ m. Servono quattro satelliti perché lo scarto dell'orologio del ricevitore è una quarta incognita accanto a x, y e z.
4. $2^{24} = 16.777.216$ indirizzi. Un messaggio di 112 bit a 1 bit per microsecondo dura 112 microsecondi, 120 con il preambolo.
5. In 8D4840D6..., 8D è 10001101: i primi cinque bit 10001 valgono 17, quindi DF = 17, un messaggio ADS-B da un transponder Mode S; i tre successivi, 101, danno CA = 5. 4840D6 è l'indirizzo ICAO.
6. Orizzonte radio da un'antenna a 15 m verso un aereo a 9000 m: $4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407$ km. Per un aereo a 300 m: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87$ km.

7. Raddoppiare la distanza riduce a un quarto la potenza ricevuta, perché la stessa potenza trasmessa si distribuisce su una sfera di area quattro volte maggiore. Attenuazione di tratta a 200 km e 1090 MHz: $20 \times 2,30 + 60,7 + 32,4 = 139$ dB, 6 dB in meno che a 400 km, coerente con un fattore quattro.
8. Un'antenna posata in orizzontale ha polarizzazione incrociata rispetto all'onda polarizzata verticalmente e riceve pochissimo; la corrente indotta dipende dalla componente del campo elettrico lungo il conduttore. Un ricevitore al piano terra perde portata perché la distanza del suo orizzonte, $4,12 \times \sqrt{h1}$, si riduce, e perché gli edifici bloccano la linea di vista.

PROSSIMO PASSO

Il progetto, passo dopo passo

Il progetto della lezione 6 presupponeva un ricevitore; il laboratorio pratico lo costruisce. È scritto per chi non ha mai usato un Raspberry Pi: la lista della spesa con i prezzi, l'antenna da scegliere, il suo posizionamento e la perdita nel cavo, la preparazione del Pi, i tre comandi che installano il feeder Dataero, l'associazione della stazione, la regolazione del guadagno e cinque misure, una per lezione, che mettono alla prova la fisica con il cielo. Una stazione che alimenta Dataero dà alla classe una dashboard, una mappa di copertura e un anno di storico su cui lavorare.

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