

DE 12 A 18 ANOS - PARA O PROFESSOR

Decodificando o céu: física e computação por meio de um sistema real

Cinco aulas e um projeto. Cada aula toma uma parte do ADS-B e desenvolve por completo a física ou a computação por trás dela: deduções onde a turma consegue acompanhá-las, exemplos resolvidos com números reais, as demonstrações que tornam a ideia observável e os pontos em que a intuição dos alunos falha. A ponta mais nova da faixa (12 a 14 anos) acompanha as ideias e a aritmética; a ponta mais velha (15 a 18) acompanha as deduções e executa o projeto.

Aprender - <https://radar.dataero.eu/pt-br/learning/ages-12-18> 2026-10-22

SUMÁRIO

Antes de começar: por que um sistema real vale cinco aulas

AULA 1 - FÍSICA Ondas e o espectro eletromagnético: em que a mensagem viaja

AULA 2 - FÍSICA E MATEMÁTICA Tempo e posição: como a aeronave sabe onde está, e como uma rede encontra uma que não quer dizer

AULA 3 - COMPUTAÇÃO A mensagem digital: 112 bits, como são enviados e como os erros são detectados

AULA 4 - FÍSICA Propagação e alcance: a curva da Terra e a lei do inverso do quadrado

AULA 5 - FÍSICA E ENGENHARIA Antenas e receptores: de uma onda de 27 centímetros a um ponto no mapa

PROJETO - DE DUAS A QUATRO SEMANAS Monte um receptor e teste a física contra o céu

Respostas aos desafios do aluno

A SEGUIR O projeto, passo a passo

Antes de começar: por que um sistema real vale cinco aulas

A maior parte da física ensinada entre os 12 e os 18 anos é ensinada em pedaços: uma unidade sobre ondas aqui, uma sobre o espectro eletromagnético ali, um tópico sobre dados digitais em computação, uma menção a satélites em geografia. O ADS-B é um único sistema em funcionamento em que todos esses pedaços são estruturais ao mesmo tempo, e em que a turma pode observar o resultado com um receptor que custa menos do que um livro didático. Uma aeronave determina a sua posição cronometrando sinais de rádio de satélites, o que é trilateração e a velocidade da luz. Ela codifica o resultado em 112 bits com uma verificação de redundância cíclica, o que é codificação binária e detecção de erros. Ela os transmite como uma onda de rádio modulada por posição de pulso em 1090 MHz, o que é o espectro, a frequência e o comprimento de onda. A onda só alcança um receptor ao longo de uma linha reta que passe livre da curva da Terra, e chega enfraquecida pelo inverso do quadrado da distância, o que é geometria e energia. Uma antena sintonizada de um quarto de comprimento de onda a converte em corrente, o que é ressonância. E uma rede de receptores consegue localizar até um transmissor silencioso a partir de diferenças de tempo de chegada, que é o problema dos satélites virado do avesso. Cada aula abaixo toma um desses itens e o desenvolve por mérito próprio, com o ADS-B como exemplo condutor, e não como decoração.

O curso de referência na página inicial apresenta o sistema inteiro em forma narrativa, e a turma deve ler os seus capítulos 3 e 5 antes da aula 3 e os capítulos 6 a 8 antes das aulas 4 e 5; o seu glossário é um material de apoio útil. Esta página pressupõe que você o leu e se concentra na física e no ensino. As convenções numéricas são consistentes do início ao fim: $c = 3,00 \times 10^8$ m/s, $f = 1090$ MHz, alturas em metros, distâncias em quilômetros, e a aeronave em cruzeiro tomada a 11.000 m (nível de voo 360) e 250 m/s, salvo quando o exemplo disser o contrário.

Dois avisos sobre a intuição. Os alunos chegam acreditando que as ondas de rádio são um tipo de som e que o "radar" ou os "satélites" veem as aeronaves. As duas coisas estão erradas, as duas são tratadas explicitamente nas aulas 1 e 2, e as duas vão reaparecer; o curso foi concebido para que cada aula seguinte dê a você uma nova razão para corrigi-las. E alunos que se sentem à vontade com fórmulas muitas vezes não se sentem à vontade com ordens de grandeza: o curso se apoia fortemente em perguntar "quão grande é isso?" a cada passo, porque 300 m por microssegundo, 145 dB de perda de percurso e 2^{24} endereços são o tipo de número que faz a física parecer real.

AULA 1 - FÍSICA

Ondas e o espectro eletromagnético: em que a mensagem viaja

Comece pela observação sobre a qual todo o curso se apoia: a mensagem de rádio de uma aeronave e um feixe de luz são o mesmo fenômeno físico. Ambos são ondas eletromagnéticas, campos elétrico e magnético oscilantes que se propagam pelo espaço sem nenhum meio, a uma velocidade c que é a mesma para toda frequência no vácuo e quase a mesma no ar: 299.792.458 m/s, que a turma pode tomar como $3,00 \times 10^8$ m/s. A grandeza que distingue o rádio da luz visível, e a luz visível dos raios X, é apenas a frequência f da oscilação. As nossas retinas respondem a frequências entre cerca de 4×10^{14} e 8×10^{14} Hz, que percebemos como do vermelho ao violeta; o ADS-B é transmitido a $1,09 \times 10^9$ Hz, aproximadamente meio milhão de vezes mais baixo. Nada na onda é diferente em natureza; apenas os nossos olhos são seletivos.

Deduza a equação da onda para a turma em vez de enunciá-la. Se uma onda viaja à velocidade c e oscila f vezes por segundo, então em um segundo ela avançou uma distância c e produziu f ciclos completos; cada ciclo ocupa, portanto, um comprimento c / f . Esse comprimento é o comprimento de onda, λ , e assim $c = f \times \lambda$. Aplicado ao ADS-B: $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. A mensagem entre a aeronave e o receptor tem cristas separadas por 27,5 cm. Peça à turma que coloque isso num espectro que eles mesmos desenhem, num eixo logarítmico: rádio FM a 100 MHz e 3 m, ADS-B a 1.090 MHz e 27,5 cm, celulares a 1.800 MHz e 17 cm, Wi-Fi e fornos de micro-ondas a 2.450 MHz e 12 cm, infravermelho, luz visível a $5,6 \times 10^{14}$ Hz e 540 nm, e assim por diante até os raios X. O exercício de colocar a onda da aeronave entre um celular e um forno vale mais do que qualquer tabela, porque deixa claro que são vizinhos.

Agora enfrente a confusão com o som diretamente, porque ela é universal e porque o contraste ensina os dois fenômenos. O som é uma onda longitudinal de pressão em um meio; a sua velocidade é uma propriedade do meio, 343 m/s no ar a 20 graus, cerca de 1.500 m/s na água e zero no vácuo. O rádio é uma onda eletromagnética transversal que não precisa de meio algum, viajando a c no vácuo e imperceptivelmente mais devagar no ar. Ponha um número na diferença: $3,00 \times 10^8$ dividido por 343 dá cerca de 875.000. Uma aeronave a 30 km que emite um som e uma mensagem no mesmo instante entrega a mensagem em 100 microssegundos e o som em 87 segundos; quando o som chega, a

aeronave já voou 22 km. A demonstração é uma corda na sala de aula e uma lanterna de uma ponta à outra do campo: uma onda na corda visivelmente precisa da corda e viaja a uma velocidade que a corda define, e um piscar de lanterna chega à outra ponta sem nenhum atraso que alguém consiga medir. Liste explicitamente o que a corda compartilha com a luz (uma onda, um comprimento de onda, uma frequência, uma velocidade fixa e, portanto, uma relação inversa entre f e λ) e o que não compartilha (um meio, uma velocidade de metros por segundo).

Termine com a polarização, que é barata de mostrar e rende na aula 5. O campo elétrico de uma onda eletromagnética oscila numa direção definida, perpendicular à sua propagação. As antenas dos transponders das aeronaves são verticais, de modo que a onda ADS-B é polarizada verticalmente; uma antena receptora também precisa ser vertical, e virada na horizontal ela quase não ouve nada. Uma onda numa corda sacudida verticalmente atravessa uma fenda vertical numa caixa de papelão e é barrada por uma horizontal; dois pedaços de filme polarizador (de um par de óculos 3D baratos) cruzados contra uma janela mostram a mesma coisa para a luz. Peça à turma que preveja o que acontece com a recepção se uma antena receptora for deitada. Eles vão testar a previsão no projeto.

Exemplo resolvido para propor

O segundo sistema ADS-B, usado por aeronaves leves nos Estados Unidos, transmite em 978 MHz. Qual é o seu comprimento de onda, e que comprimento teria uma antena de um quarto de onda para ele? (0,307 m; 7,7 cm.) Um aluno que consegue fazer isso dominou a aula 1.

AULA 2 - FÍSICA E MATEMÁTICA**Tempo e posição: como a aeronave sabe onde está, e como uma rede encontra uma que não quer dizer**

Tudo o que a aeronave transmite sobre a sua posição vem da navegação por satélite, e a navegação por satélite é, no fundo, uma medição de tempo. Cada satélite GNSS, orbitando a cerca de 20.200 km, leva um relógio atômico e transmite um sinal que informa a sua própria posição e o instante exato da transmissão. Um receptor anota o instante de chegada. A diferença, multiplicada por c , é a distância até aquele satélite, e uma única distância dessas coloca o receptor sobre uma esfera com esse raio centrada no satélite. Deixe a turma deduzir as contagens: duas esferas se cruzam em um círculo, três em dois pontos, um dos quais está longe da superfície da Terra e pode ser descartado. Então três satélites bastariam, dado um relógio perfeito no receptor. Ele não tem nada disso; um oscilador de quartzo deriva muito mais do que os nanossegundos necessários. A solução, que é o coração elegante do assunto, é tratar o erro do relógio do receptor como uma quarta incógnita e usar um quarto satélite: quatro equações com quatro incógnitas (x , y , z e o desvio do relógio), resolvidas continuamente. Um receptor GNSS precisa, portanto, de quatro satélites à vista, e como subproduto mantém a hora com precisão de dezenas de nanossegundos, e é por isso que os receptores da rede da aula 5 usam os mesmos satélites que a aeronave para os seus relógios.

Ponha as ordens de grandeza no quadro e volte a elas sempre. A luz percorre 0,300 m em um nanossegundo e 300 m em um microssegundo. Um erro de tempo de 1 microssegundo é um erro de distância de 300 m; a precisão de alguns metros de um receptor moderno corresponde a uma medição de tempo da ordem de dez nanossegundos. O tempo de viagem a partir de um satélite diretamente acima é $20.200 \text{ km} / 3,00 \times 10^8 \text{ km/s} = 0,0673 \text{ s}$, e a partir de um perto do horizonte, cerca de 0,086 s,

de modo que o receptor está medindo diferenças de alguns milissegundos com uma precisão de um centésimo de milionésimo disso. Pergunte à turma o que aconteceria se o relógio de um satélite estivesse adiantado em um microssegundo; eles devem perceber que todo receptor que o usasse seria empurrado cerca de 300 m ao longo da linha em direção a ele, e é por isso que os relógios dos satélites são corrigidos a partir do solo várias vezes por dia.

Separe as duas altitudes, porque a mensagem carrega as duas e os alunos sempre perguntam. A solução por satélite dá uma altura geométrica acima do elipsoide de referência da Terra. As aeronaves, no entanto, informam a altitude barométrica: a pressão estática do lado de fora da fuselagem convertida em altura pela Atmosfera Padrão Internacional, que pressupõe 1013,25 hPa e 15 graus ao nível do mar e uma queda de 6,5 graus por quilômetro. Em um dia em que a pressão real difere da padrão, a altitude barométrica de todas as aeronaves está errada pela mesma quantidade, que é exatamente o que a separação precisa: duas aeronaves lendo os níveis de voo 350 e 360 estão a 1.000 pés uma da outra, seja qual for o tempo. As mensagens de posição ADS-B carregam a altitude barométrica em passos de 25 pés; a mensagem de velocidade carrega a diferença entre a altura barométrica e a geométrica, de modo que um receptor pode recuperar as duas. Para o grupo mais velho, a relação da ISA $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ rende um bom exercício de planilha: inverta-a para achar h a partir de p e confira que 11.000 m correspondem a cerca de 227 hPa, um quinto da pressão ao nível do mar.

Agora vire o problema do avesso. Algumas aeronaves transmitem em 1090 MHz sem uma posição por satélite: transponders mais antigos respondendo ao radar apenas com identidade e altitude, ou aeronaves cujo GNSS sofre interferência. Uma rede de receptores ainda consegue localizá-las. Suponha que quatro receptores com relógios sincronizados registrem o instante de chegada da mesma transmissão. O transmissor é desconhecido, os receptores são conhecidos: é o problema do GNSS com os papéis de conhecido e desconhecido trocados. Uma mensagem que chegou ao receptor A um microssegundo antes do receptor B foi enviada de um ponto 300 m mais próximo de A do que de B, e o lugar geométrico desses pontos é um hiperboloide com A e B como focos. Três pares independentes de quatro receptores dão três hiperboloides, cuja interseção é a aeronave. Isso é a multilateração, e ela exige que os relógios dos receptores concordem a cerca de 100 ns, o que eles obtêm dos satélites. Para a turma, reduza a duas dimensões com o exercício do pátio: três alunos com cronômetros em pontos medidos, um quarto escondido em algum lugar bate palma, os três registram os seus atrasos corrigidos pelo tempo de reação, e a turma desenha as hipérboles (ou, mais simplesmente, testa posições num desenho em escala) para encontrar quem bateu palma, usando 343 m/s. Depois pergunte qual precisão de tempo seria necessária para fazer o mesmo com rádio ao longo de 200 km, e deixe que sintam a distância entre um cronômetro e um relógio atômico.

Exemplo resolvido para propor

Dois receptores a 60 km um do outro registram uma mensagem com 50 microssegundos de diferença. Quanto mais perto do primeiro receptor estava a aeronave? (15 km.) Se os relógios estivessem desalinhados entre si em 1 microssegundo, que erro isso introduziria na resposta? (300 m.) Um aluno que consegue explicar por que a segunda resposta não depende da distância entendeu o que a multilateração exige.

AULA 3 - COMPUTAÇÃO

A mensagem digital: 112 bits, como são enviados e como os erros são detectados

O transponder da aeronave envia os seus dados ADS-B como um squitter estendido Mode S: um preâmbulo de 8 microssegundos seguido de 112 bits de dados a exatamente um bit por microssegundo. Comece a aula pelo preâmbulo, porque ele responde a uma pergunta que os alunos ainda não pensaram em fazer: como um receptor sabe que uma mensagem começou, quando o canal está cheio de ruído e de outras aeronaves? O preâmbulo é um padrão fixo de quatro pulsos em 0, 1, 3,5 e 4,5 microssegundos. Um decodificador está constantemente procurando esse padrão; quando o encontra, sabe tanto que uma mensagem vem a seguir quanto precisamente quando cada intervalo de bit começa. Todo protocolo digital que os alunos já encontraram, do Wi-Fi a um código QR, tem um equivalente, e este é um bom momento para dizer isso.

Depois a modulação. Um rádio pode estar ligado ou desligado; como enviar um 1 ou um 0? O ADS-B usa a modulação por posição de pulso: cada intervalo de bit de um microssegundo é dividido em duas metades, e um pulso na primeira metade seguido de silêncio significa 1, silêncio seguido de um pulso significa 0. Desenhe alguns bits no quadro como pulsos e peça à turma que os leia. Depois pergunte por que isso é melhor do que o esquema óbvio de "pulso significa 1, ausência de pulso significa 0". Duas razões surgem com um pouco de estímulo. Há sempre exatamente um pulso por bit, de modo que o receptor consegue manter a sua sincronização mesmo ao longo de uma sequência de zeros, e ele pode decidir cada bit perguntando qual metade foi mais forte, em vez de se um pulso ultrapassou algum limiar absoluto, o que torna a decodificação insensível à intensidade que o sinal por acaso tenha. Uma longa sequência de zeros no esquema ingênuo seria indistinguível do silêncio; em PPM ela é uma batida constante de pulsos na segunda metade.

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



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

Agora a estrutura dos 112 bits, que a turma deve conseguir reproduzir de memória ao fim da aula. Os bits 1 a 5 são o formato de downlink, 17 para ADS-B vindo de um transponder. Os bits 6 a 8 são um código de capacidade. Os bits 9 a 32 são o endereço ICAO de 24 bits, a identidade permanente da aeronave. Os bits 33 a 88 são o campo de mensagem de 56 bits, cujos cinco primeiros bits, o código de tipo, dizem o que os 51 restantes contêm: uma mensagem de identificação (códigos de tipo 1 a 4) carrega o indicativo de chamada de oito caracteres como oito caracteres de 6 bits; uma posição em voo (9 a 18) carrega 12 bits de altitude barométrica, um sinalizador dizendo se este é um quadro par ou ímpar, e 17 bits cada de latitude e longitude codificadas; uma mensagem de velocidade (19) carrega as componentes leste-oeste e norte-sul da velocidade em relação ao solo, a razão vertical e a diferença entre as alturas barométrica e geométrica. Os bits 89 a 112 são a paridade de 24 bits. Proponha a aritmética: 24 bits de endereço dão $2^{24} = 16.777.216$ aeronaves; oito caracteres de 6 bits permitem 64 símbolos cada, o bastante para letras, dígitos e espaço; 12 bits de altitude em passos de 25 pés

cobrem 102.400 pés; e 17 bits de latitude, se usados ingenuamente sobre 180 graus, resolveriam apenas 1,4 km, o que levanta a pergunta que o relato compacto de posição responde. Explique o CPR em um parágrafo: os 17 bits dão a posição dentro de uma zona com precisão de poucos metros, não qual é a zona; a aeronave alterna entre duas grades de zonas, par e ímpar, e um receptor que tem uma de cada consegue resolver a zona sem ambiguidade e depois rastrear a partir de mensagens isoladas. É um belo exemplo de como obter mais precisão dos mesmos bits usando o tempo.

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

Dê à turma uma mensagem real e deixe que a dissequem. A cadeia hexadecimal 8D4840D6202CC371C32CE0576098 tem 28 dígitos hexadecimais, 112 bits. Converter os dois primeiros dígitos, 8D, para binário dá 10001 101: DF = 17, CA = 5. Os seis dígitos seguintes, 4840D6, são o endereço ICAO, que as tabelas de alocação atribuem aos Países Baixos. Os dígitos seguintes, 20 ..., começam com 00100, código de tipo 4, uma mensagem de identificação, e decodificar os caracteres de 6 bits que vêm a seguir dá o indicativo de chamada KLM1023. Os últimos seis dígitos, 576098, são a paridade. Uma turma com uma planilha ou algumas linhas de Python consegue fazer toda a decodificação em uma aula, e a capacidade de pegar uma cadeia de hexadecimais e dizer "isso é uma aeronave da KLM anunciando o seu número de voo" é o resultado a buscar.

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: formato de downlink 17, capacidade 5. 4840D6: endereço ICAO, alocado aos Países Baixos. 20...: código de tipo 4, identificação, indicativo de chamada KLM1023. 576098: a paridade de 24 bits.

Termine com a paridade, porque é a ideia de computação que mais vale desenvolver. Sobre um aeroporto movimentado, mensagens de aeronaves diferentes se sobrepõem em um receptor constantemente, e pulsos também se perdem no ruído; um decodificador inevitavelmente montará bits errados. O campo de 24 bits no fim é uma verificação de redundância cíclica: os 88 bits da mensagem são tratados como um número binário longo e divididos, em uma aritmética especial em que a subtração é o ou-exclusivo, por um gerador fixo de 25 bits; o resto é o CRC. O receptor repete a divisão sobre os bits que decodificou e compara. Qualquer bit corrompido isolado, quaisquer dois, e qualquer rajada de erros de até 24 bits de comprimento muda o resto, de modo que a mensagem corrompida é rejeitada. Demonstre a ideia em pequena escala com um CRC de 4 bits sobre uma mensagem de 8 bits feito à mão, ou com o análogo mais simples de um dígito verificador num código de barras; depois peça ao grupo mais velho que implemente o CRC-24 real em algumas linhas de código e verifique que a paridade da mensagem de exemplo bate, e que inverter um bit a faz falhar. Isso é detecção de erros como todo sistema moderno a faz, encontrada num contexto em que um erro não detectado poderia colocar uma aeronave fantasma na tela de um controlador.

Exemplo resolvido para propor

Quanto dura uma transmissão completa e, se um transponder envia 4,5 squitters estendidos por segundo, que fração do tempo ele passa transmitindo ADS-B? (120 microssegundos; 540 microssegundos por segundo, 0,054 por cento.) Quantas aeronaves poderiam, em princípio, compartilhar o canal antes que ele estivesse continuamente ocupado, ignorando tudo o mais que é transmitido nele? (Cerca de 1.850, e é por isso que o congestionamento sobre o espaço aéreo mais movimentado é uma preocupação real de engenharia.)

AULA 4 - FÍSICA**Propagação e alcance: a curva da Terra e a lei do inverso do quadrado**

A que distância um receptor consegue ouvir uma aeronave? A pergunta tem duas respostas independentes, geométrica e energética, e o propósito da aula é deduzir as duas e descobrir que os projetistas fizeram com que concordassem. Tome primeiro a geometria. Em 1090 MHz, o rádio não se difrata de forma útil ao redor da Terra; ele se comporta como luz e viaja em linha reta. Um receptor só consegue, portanto, ouvir aeronaves acima do seu horizonte, isto é, aeronaves a partir das quais uma linha reta até a antena não atravesse o chão. Deduza a distância do horizonte com a turma. Uma antena a uma altura h acima de uma esfera de raio R vê um horizonte onde a sua linha de visada é tangente à esfera. A tangente, o raio até o ponto de tangência e o raio até a antena formam um ângulo reto no ponto de tangência, de modo que, por Pitágoras, $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, dando $d^2 = 2Rh + h^2$. Como h é minúsculo diante de R , $d = \sqrt{2Rh}$. Com $R = 6.371$ km e h em metros, d em quilômetros = $\sqrt{2 \times 6371 \times h / 1000} = 3,57 \sqrt{h}$. A densidade da atmosfera, e portanto o seu índice de refração, cai com a altura, o que curva os raios de rádio ligeiramente para baixo; a correção padrão trata a Terra como se tivesse quatro terços do seu raio verdadeiro, substituindo 3,57 por 4,12. A linha de visada completa de uma antena a h_1 até uma aeronave a h_2 é a soma das duas distâncias de horizonte:

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad \text{com } h_1, h_2 \text{ em metros}$$

Antena num telhado de 20 m, aeronave a 11.000 m: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451$ km. Mesma antena, aeronave a 1.000 m: $4,12 \times (4,47 + 31,6) = 149$ km. Aeronave na pista a 30 m: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27$ km, portanto não é ouvida.



Peça à turma que trace d em função de h_2 para a altura da antena da própria escola; a curva, íngreme no início e depois achatando, explica a forma da cobertura de todo receptor: um círculo de 400 km ou mais para o tráfego em cruzeiro, algumas dezenas de quilômetros para aeronaves em aproximação, e nada no

solo, exceto no aeroporto ao lado. Explica também por que a altura importa mais do que qualquer outra propriedade de um receptor, e por que um morro entre você e o aeroporto, ou a própria asa da aeronave quando ela inclina para longe, corta uma trajetória instantaneamente. A demonstração do pátio do curso do fundamental I, ver mais longe de um banco do que agachado, não está abaixo desta faixa etária se você a fizer seguir da dedução; o ponto é que agora eles sabem o porquê.

Agora a energia. Um transponder irradia uma potência de pico de algumas centenas de watts, de modo aproximadamente uniforme em todas as direções horizontais. À distância d , essa potência se espalhou por uma esfera de área $4\pi d^2$, de modo que a potência interceptada por uma antena de área efetiva fixa cai como $1/d^2$: a lei do inverso do quadrado, que a turma deve deduzir a partir da área da esfera em vez de memorizar. O dobro da distância, um quarto da potência; dez vezes, um centésimo. Os engenheiros de rádio expressam a perda entre um transmissor isotrópico e um receptor isotrópico em decibéis, e a fórmula padrão, que o grupo mais velho pode aceitar sem demonstração ou deduzir a partir da área efetiva de uma antena, $\lambda^2 / 4\pi$, é:

$$\text{perda de percurso (dB)} = 20 \log_{10}(d \text{ em km}) + 20 \log_{10}(f \text{ em MHz}) + 32.44$$

A 400 km e 1090 MHz: $20 \times 2,60 + 20 \times 3,04 + 32,44 = 52,0 + 60,7 + 32,4 = 145$ dB. Um transmissor de 250 W é +54 dBm; a potência recebida é $54 - 145 = -91$ dBm, cerca de 8×10^{-13} W, ou um milionésimo de milionésimo de watt.

Dedique alguns minutos aos decibéis se a turma ainda não os conhece, porque eles transformam uma multiplicação através de catorze ordens de grandeza em uma adição, e porque o número em si é instrutivo: um receptor num telhado está detectando um sinal $10^{14,5}$ vezes mais fraco do que aquele que saiu da aeronave. Um bom receptor de hobby consegue decodificar até cerca de -100 dBm, de modo que há cerca de 9 dB de folga a 400 km, o que quer dizer que o limite energético e o horizonte geométrico para um avião de passageiros em cruzeiro caem no mesmo lugar. Isso não é acidente; a potência do transponder e as normas dos receptores foram especificadas de modo que uma aeronave seja audível até o horizonte e não muito além, o que evita que o canal seja inundado por transmissões do país vizinho.

Dois refinamentos para o grupo mais velho. Primeiro, o efeito Doppler: uma aeronave se aproximando a 250 m/s desloca a frequência recebida em $f \times v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Hz, menos de uma parte em um milhão da portadora, o que um receptor nunca nota; compare com o deslocamento Doppler audível do som da aeronave, em que v / c é $250 / 343$ e a altura do som muda quase uma oitava quando ela passa. Segundo, o tempo de voo do sinal: 400 km a c são 1,33 ms, de modo que a posição na mensagem já tem 1,33 ms de idade, tempo em que a aeronave se moveu 33 cm; desprezível para um mapa, decisivo para a multilateração da aula 2, que vive exatamente desses microssegundos.

Exemplo resolvido para propor

Um receptor num mastro de 10 m ouve uma aeronave em cruzeiro a 11.000 m, mas não uma aeronave leve a 600 m que está a 130 km. A aeronave leve está abaixo do horizonte? (Horizonte: $4,12 \times (3,16 + 24,5) = 114$ km, portanto sim.) A que altura o receptor precisaria estar para ouvi-la? (É preciso $4,12 \times (\sqrt{h_1} + 24,5) = 130$, então $\sqrt{h_1} = 7,05$, $h_1 = 50$ m.)

AULA 5 - FÍSICA E ENGENHARIA

Antenas e receptores: de uma onda de 27 centímetros a um ponto no mapa

Uma antena é um condutor em que uma onda eletromagnética que passa induz uma corrente alternada; a antena receptora e a antena transmissora são o mesmo dispositivo operando em sentidos opostos, uma reciprocidade que deve ser dita explicitamente à turma. A corrente induzida é máxima quando o condutor ressoa: quando o seu comprimento é tal que a distribuição de corrente ao longo dele se encaixa na oscilação da onda, exatamente como uma corda do comprimento certo ressoa com uma nota específica, ou um balanço com um ritmo específico de empurrões. A ressonância fundamental de um condutor reto está em meio comprimento de onda, 13,75 cm em 1090 MHz, com corrente máxima no meio e nula nas extremidades. A antena ADS-B prática, na aeronave e na maioria dos receptores, é um monopolo de um quarto de onda: um elemento vertical de 6,9 cm apoiado sobre um plano de terra condutor, que o espelha eletricamente de modo que elemento e imagem formem juntos o dipolo de meia onda. Na aeronave, a fuselagem é o plano de terra; uma antena de 1090 MHz comprada esconde a mesma geometria dentro do seu tubo, empilhada várias vezes para concentrar a sua sensibilidade na direção do horizonte. Um modelo construído em sala com uma vareta de 6,9 cm sobre uma tampa de lata mostra a geometria e o comprimento, medido com uma régua contra a onda de 27,5 cm; o receptor do projeto, porém, usa a antena sintonizada de fábrica, porque alguns milímetros de erro dessintonizam uma antena caseira, e ela ouve uma fração do céu.

Desenvolva o diagrama de irradiação, porque ele prevê algo que a turma pode observar. Um monopolo vertical irradia e recebe com mais força na direção do horizonte e nada ao longo do próprio eixo; a sua sensibilidade, traçada em três dimensões, é uma rosquinha com a antena atravessando o buraco. Por isso um receptor tipicamente ouve aeronaves a 300 km perfeitamente e perde por alguns segundos uma que passa diretamente acima, e a turma pode ver isso acontecer no próprio receptor. Uma antena colinear, vários elementos ressonantes empilhados, achata a rosquinha, aumentando a sensibilidade no horizonte, onde estão as aeronaves distantes, à custa do buraco vertical: isso é o ganho de antena, expresso em dBi, e ele vem de redistribuir a sensibilidade, nunca de criá-la. A polarização, da aula 1, tem agora uma consequência prática que o projeto vai testar: a antena precisa estar na vertical.

Entre a antena e o computador há três estágios, cada um uma pequena aula. Um filtro passa-faixa deixa passar 1090 MHz e rejeita as transmissões de telefonia celular, muito mais fortes, a algumas centenas de megahertz de distância, que de outro modo saturariam o amplificador. Um amplificador de baixo ruído, colocado junto à antena e não junto ao receptor, multiplica o sinal mil vezes antes que ele entre no cabo; a ordem importa, porque um cabo coaxial em 1090 MHz perde aproximadamente metade do sinal, 3 dB, a cada dez metros, e amplificar depois da perda amplificaria o ruído do cabo junto com o sinal. Depois o rádio definido por software: um dispositivo USB de 20 euros originalmente feito como sintonizador de televisão, que mistura o sinal para a banda base e o amostra dois milhões de vezes por segundo, gerando um fluxo de números. A partir desse ponto, o problema de rádio é um problema de programação. Um software livre varre o fluxo de amostras em busca do padrão do preâmbulo, mede qual metade de cada intervalo de um microssegundo carrega mais energia, monta 112 bits, calcula o CRC e, se ele passar, decodifica os campos. Um rastreador então parecia quadros de posição pares e ímpares, funde posição, velocidade e identificação pelo endereço ICAO e mantém o estado de cada aeronave até que as mensagens parem de chegar.

Dê a cadeia à turma como um diagrama que eles mesmos desenhem, com a grandeza em cada estágio: nanovolts de corrente alternada na antena; microvolts depois do amplificador; dois milhões de números de 8 bits por segundo saindo do SDR; quadros de 112 bits saindo do decodificador, talvez algumas centenas por segundo; um registro por aeronave saindo do rastreador. O ponto a fixar é que um ponto no mapa é a extremidade de uma cadeia em que cada elo é uma ideia que agora eles entendem: ressonância, filtragem, amplificação, amostragem, reconhecimento de padrões, decodificação, verificação de erros, agregação.

Exemplo resolvido para propor

Um cabo perde 3 dB a cada 10 m em 1090 MHz. Um trecho de 20 m perde, portanto, que fração do sinal? (6 dB, três quartos.) Se o limite do receptor é -100 dBm e o sinal na antena vindo de uma aeronave a 400 km é -91 dBm, o sinal consegue sobreviver ao cabo sem um amplificador? (Por muito pouco: -97 dBm. Qualquer perda adicional, chuva nos conectores ou um trecho mais longo, e a aeronave no horizonte desaparece. É por isso que o amplificador vai junto à antena.)

PROJETO - DE DUAS A QUATRO SEMANAS**Monte um receptor e teste a física contra o céu**

O projeto transforma as cinco aulas em medições. O equipamento é um dongle USB de rádio definido por software (cerca de 25 euros), uma antena de 1090 MHz sintonizada de fábrica (50 a 70 euros), alguns metros de cabo coaxial e um laptop ou um Raspberry Pi executando um dos decodificadores livres (o dump1090 e os seus descendentes são o padrão). A instalação leva uma tarde, e o software mostra, em minutos, uma tabela de aeronaves com os seus endereços ICAO, indicativos de chamada, posições, altitudes e velocidades, e um mapa. Tudo no projeto é apenas recepção; nada transmite, e a turma deve entender que transmitir em frequências aeronáuticas seria ilegal e perigoso. O acesso ao telhado precisa da aprovação habitual da escola; uma janela num andar superior voltada para os principais fluxos de tráfego é um começo perfeitamente bom. A página [Seja um feeder deste site](#) percorre a mesma instalação passo a passo e permite que o receptor da escola alimente o mapa ao vivo.

A primeira investigação é o horizonte de rádio. O decodificador informa, para cada aeronave, a distância e a altitude em que ela foi ouvida pela última vez. Ao longo de um dia, colete o alcance máximo em que aeronaves de várias faixas de altitude foram recebidas e trace o alcance em função da altitude. Os alunos têm a fórmula da aula 4 e a altura da antena; eles devem prever a curva antes de ver os dados, e depois comparar. A concordância costuma ser boa para aeronaves altas e pior para as baixas, e a discussão do porquê (prédios, relevo, o buraco vertical da antena, o sombreamento pela própria aeronave) é o tipo de confronto entre teoria e medição que um livro didático não pode oferecer. Um mapa da aeronave mais distante ouvida em cada direção, que o software desenha, mostra o relevo de toda a região como sombras na cobertura.

A segunda é a antena. Compare as taxas de mensagens e o alcance máximo com a antena dentro de casa, numa janela e no telhado; na vertical e deitada na horizontal; apoiada sobre uma superfície metálica e mantida longe de qualquer metal. Cada comparação testa uma afirmação específica das aulas 1 e 5, e cada resultado deve ser previsto antes. O teste de polarização é o mais impressionante: deitada, a antena perde a maioria das suas aeronaves.

A terceira são os dados. Registre um dia inteiro de tráfego e faça perguntas a ele: a hora mais movimentada, a distribuição das altitudes de cruzeiro (os alunos esperam uma dispersão e encontram a maioria dos aviões de passageiros entre 10.000 e 12.000 m), a razão de subida das decolagens do aeroporto mais próximo, os Estados cujas aeronaves passam com mais frequência (a partir da alocação de endereços ICAO). O grupo mais velho pode decodificar mensagens brutas por conta própria, a partir do hexadecimal que o software registra, e verificar o CRC no seu próprio código. Uma turma com um segundo receptor numa escola parceira a 30 ou mais quilômetros, ambos com saída marcada com tempo GNSS, pode tentar uma multilateração bidimensional de uma aeronave que ambos ouvem e compará-la com a posição que a aeronave transmitiu: o resultado mais ambicioso do curso, e um resultado real.

Termine com as perguntas que o sistema levanta e não responde. As mensagens não são assinadas, de modo que um transmissor poderia difundir uma aeronave fantasma; o que defende o sistema, e quanto custaria uma versão assinada? A aeronave depende de satélites que podem sofrer interferência; o que acontece com a imagem de um controlador quando isso ocorre? Os dados identificam aeronaves, e uma aeronave pode identificar uma pessoa; quem deveria poder seguir quem? Uma turma que montou o receptor fez por merecer essas perguntas, e elas rendem uma boa redação ou um bom debate final.

Respostas aos desafios do aluno

A página do aluno propõe oito desafios, um ou dois por aula, que podem ser usados como lição de casa ou como prova de fim de curso. As respostas, com o raciocínio que uma resposta de nota máxima deve conter:

1. Comprimento de onda em 1090 MHz: $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. Elemento de um quarto de onda: 6,9 cm. Raciocínio: $c = f \times \lambda$, com a velocidade fixa da luz forçando uma relação inversa.
2. A luz é mais rápida do que o som por $3,00 \times 10^8 / 343$, cerca de 875.000 vezes. Ao longo de 30 km, a mensagem leva 100 microssegundos e o som, 87 s; a aeronave a 250 m/s se move 22 km nesse tempo.
3. Um erro de relógio de 2 microssegundos dá um erro de distância de $2 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 = 600$ m. Quatro satélites são necessários porque o desvio do relógio do receptor é uma quarta incógnita ao lado de x, y e z.
4. $2^{24} = 16.777.216$ endereços. Uma mensagem de 112 bits a 1 bit por microssegundo dura 112 microssegundos, 120 com o preâmbulo.
5. Em 8D4840D6..., 8D é 10001101: os cinco primeiros bits, 10001, são 17, então DF = 17, uma mensagem ADS-B de um transponder Mode S; os três seguintes, 101, dão CA = 5. 4840D6 é o endereço ICAO.
6. Horizonte de rádio de uma antena de 15 m a uma aeronave a 9.000 m: $4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407$ km. Para uma aeronave a 300 m: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87$ km.
7. Dobrar a distância reduz a potência recebida a um quarto, porque a mesma potência transmitida se espalha por uma esfera de quatro vezes a área. Perda de percurso a 200 km e 1090 MHz: $20 \times 2,30 + 60,7 + 32,4 = 139$ dB, 6 dB a menos do que a 400 km, consistente com um fator de quatro.

8. Uma antena deitada na horizontal está com polarização cruzada em relação à onda polarizada verticalmente e recebe muito pouco; a corrente induzida depende da componente do campo elétrico ao longo do condutor. Um receptor no térreo perde alcance porque a sua distância de horizonte, $4,12 \times \sqrt{h_1}$, encolhe, e porque os prédios bloqueiam a linha de visada.

A SEGUIR

O projeto, passo a passo

O projeto da aula 6 pressupunha um receptor; a oficina prática o constrói. Ela foi escrita para quem nunca usou um Raspberry Pi: a lista de compras com preços, a antena a escolher, o seu posicionamento e a perda no cabo, a preparação do Pi, os três comandos que instalam o feeder da Dataero, a reivindicação da estação, o ajuste do ganho e cinco medições, uma por aula, que testam a física contra o c eu. Uma estação que alimenta a Dataero d    turma um painel, um mapa de cobertura e um ano de histórico para trabalhar.

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