

FÍSICA E COMPUTAÇÃO - DE 12 A 18 ANOS

Decodificando o céu

A linha em hexadecimal abaixo é uma mensagem real, enviada por uma aeronave real cerca de duas vezes por segundo. Em 112 milionésimos de segundo, ela anuncia quem é a aeronave e, nas mensagens que a acompanham, onde ela está, a que altura e a que velocidade. Este curso percorre tudo o que é preciso para entendê-la: a física da onda que a transporta, a cronometragem que dá à aeronave a sua posição, a codificação que a comprime em 112 bits, a geometria que limita de que distância ela pode ser ouvida, e o receptor que você pode montar para ouvi-la por conta própria.

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

SUMÁRIO

O que é o ADS-B, em uma página

AULA 1 A onda: o rádio como luz invisível

AULA 2 Tempo e posição: como a aeronave sabe onde está

AULA 3 A mensagem: 112 bits, e como os erros são detectados

AULA 4 Alcance: a curva da Terra e a lei do inverso do quadrado

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

Desafios

A SEGUIR Monte você mesmo

O que é o ADS-B, em uma página

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

Um squitter estendido tal como um receptor o registra: 28 dígitos hexadecimais, 112 bits. Até a aula 3, você vai conseguir ler cada campo dele.

O controle de tráfego aéreo precisa saber onde está cada aeronave, continuamente, para mantê-las separadas: um avião de passageiros em cruzeiro percorre 250 m a cada segundo, e as regras de separação exigem 300 m na vertical ou 9 km na horizontal entre aeronaves sob controle radar. Durante setenta anos, o jeito de saber foi o radar: uma estação de solo envia um pulso e cronometra o eco ou, na forma secundária aperfeiçoada, interroga um transponder na aeronave, que responde em 1090 MHz com uma identidade e uma altitude. O radar tem limites: precisa de uma potência enorme, vê cada aeronave apenas uma vez por rotação da antena e não consegue cobrir oceanos nem montanhas.

O ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (vigilância dependente automática por difusão), inverte o problema. Toda aeronave moderna leva um receptor de navegação por satélite e, portanto, conhece a própria posição com erro de poucos metros. O ADS-B simplesmente faz o transponder da aeronave anunciar essa posição, junto com a sua identidade, altitude e velocidade, cerca de duas vezes por segundo, em 1090 MHz, para ninguém em particular. Automático porque nada o dispara; dependente porque a informação vem inteiramente dos instrumentos da própria aeronave; vigilância

porque o seu propósito é saber onde as aeronaves estão; difusão porque é enviado às claras a quem estiver escutando. Desde 2020, ele é obrigatório para a maioria das aeronaves nos espaços aéreos europeu e americano. Os controladores o usam ao lado do radar, as outras aeronaves o usam para se verem mutuamente, e um receptor USB de 25 euros no telhado de uma escola ouve exatamente as mesmas mensagens.

Para entender o sistema, você precisa entender cinco coisas, e cada uma é uma aula: a onda eletromagnética que transporta a mensagem; a cronometragem que dá à aeronave a sua posição, e que permite a uma rede encontrar uma aeronave que não diz onde está; a mensagem digital e como os erros nela são detectados; a geometria e a energia que limitam de que distância ela pode ser ouvida; e a antena e o receptor que a transformam de volta em dados. A narrativa completa está no curso de referência; leia os seus capítulos 3 e 5 antes da aula 3 e os capítulos 6 a 8 antes das aulas 4 e 5.

AULA 1

A onda: o rádio como luz invisível

A mensagem sai da aeronave como uma onda eletromagnética: campos elétrico e magnético oscilantes que se propagam pelo espaço sem nenhum meio, à velocidade da luz $c = 3,00 \times 10^8$ m/s. A luz visível é o mesmo fenômeno numa frequência mais alta; os seus olhos respondem a aproximadamente 4 a 8×10^{14} Hz, enquanto o ADS-B é transmitido a $1,09 \times 10^9$ Hz, meio milhão de vezes mais baixo. Não há diferença de natureza entre a mensagem do avião e a luz desta tela, apenas de frequência.

Como a onda viaja a uma velocidade fixa, a sua frequência determina o seu comprimento de onda. Em um segundo, a onda avança c metros e completa f ciclos, de modo que cada ciclo ocupa c / f metros: $c = f \times \lambda$. Para o ADS-B, $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. A onda que passa entre uma aeronave e a sua antena tem cristas separadas por 27,5 cm, entre um sinal de celular (17 cm) e uma estação de rádio FM (3 m) no espectro. Desenhe você mesmo esse espectro, num eixo logarítmico de 10^6 Hz a 10^{18} Hz, e coloque nele o rádio FM, o ADS-B, os celulares, o Wi-Fi, o infravermelho, a luz visível e os raios X. A onda da aeronave fica entre as coisas que estão no seu bolso.

$$c = f \times \lambda$$

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

O que uma onda de rádio não é: som. O som é uma onda de pressão em um meio, viajando a 343 m/s no ar, 1.500 m/s na água, e de jeito nenhum no vácuo. O rádio é luz: não precisa de meio, e é assim que atravessa o vácuo de um satélite até a aeronave, e é mais rápido por um fator de $3,00 \times 10^8 / 343$, cerca de 875.000. Se uma aeronave a 30 km emite um som e uma mensagem no mesmo instante, a mensagem chega em 100 microssegundos; o som chega 87 segundos depois, e a essa altura a aeronave já voou 22 km. Uma onda numa corda compartilha com a luz as propriedades que importam, um comprimento de onda, uma frequência e uma velocidade fixa, de modo que sacudir mais rápido significa ondas mais curtas, e não mais rápidas; ela difere por precisar da corda.

Uma propriedade da onda vai importar na aula 5: a sua polarização. O campo elétrico oscila numa direção definida, perpendicular à direção de propagação. As antenas das aeronaves são verticais, de modo que a onda ADS-B é polarizada verticalmente, e uma antena receptora deitada de lado intercepta

quase nada dela, assim como uma onda numa corda sacudida verticalmente é barrada por uma fenda horizontal. Preveja agora o que vai acontecer com o alcance do seu receptor se a antena estiver na horizontal; você vai testar isso no projeto.

AULA 2

Tempo e posição: como a aeronave sabe onde está

A posição em toda mensagem ADS-B vem da navegação por satélite, e a navegação por satélite é uma medição de tempo. Cerca de trinta satélites por sistema (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) orbitam a aproximadamente 20.200 km, cada um com um relógio atômico, cada um transmitindo um sinal que informa a sua própria posição e o instante exato da transmissão. O receptor na aeronave anota o instante de chegada. A diferença, multiplicada por c , é a distância até aquele satélite; vindo de diretamente acima, o sinal leva $20.200 / 300.000 = 0,0673$ s. Uma distância coloca o receptor sobre uma esfera ao redor daquele satélite; duas esferas se encontram em um círculo; três se encontram em dois pontos, um deles longe da Terra e descartado. Três satélites bastariam se o receptor tivesse um relógio perfeito. Ele tem um cristal de quartzo que deriva microssegundos, e um microssegundo são 300 m de distância. Então o receptor trata o erro do próprio relógio como uma quarta incógnita e usa um quarto satélite: quatro equações, quatro incógnitas (x , y , z e o desvio do relógio), resolvidas continuamente. Como subproduto, todo receptor de satélite mantém a hora com precisão de dezenas de nanossegundos, do que depende a segunda metade desta aula.

Guarde as ordens de grandeza: a luz percorre 0,3 m por nanossegundo e 300 m por microssegundo. Uma posição com precisão de 3 m significa uma medição de tempo com precisão de 10 ns. Um satélite cujo relógio estivesse 1 microssegundo adiantado empurraria todo receptor que o usasse 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.

A aeronave carrega duas altitudes. A solução por satélite dá uma altura geométrica acima do elipsoide de referência. Mas a altitude que ela transmite para fins de controle de tráfego aéreo é barométrica: a pressão do ar numa tomada na fuselagem, convertida em altura pela Atmosfera Padrão Internacional, que pressupõe 1013,25 hPa e 15 graus C ao nível do mar e uma queda de 6,5 graus por quilômetro. Quando a pressão real difere da padrão, a altitude barométrica de todas as aeronaves está errada pela mesma quantidade, que é precisamente 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. A mensagem de posição carrega a altitude barométrica em passos de 25 pés; a mensagem de velocidade carrega a diferença entre a altura barométrica e a geométrica. Se você tiver uma planilha, inverta $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ e confira que a 11.000 m a pressão é de cerca de 227 hPa, menos de um quarto da do nível do mar: o ar que um avião de passageiros atravessa não manteria você consciente.

Agora inverta a ideia inteira. Algumas aeronaves transmitem em 1090 MHz sem uma posição: transponders antigos respondendo ao radar apenas com identidade e altitude, ou aeronaves cuja recepção de satélite sofre interferência. Uma rede de receptores ainda consegue localizá-las por multilateração. Suponha que quatro receptores com relógios sincronizados registrem, cada um, o instante de chegada da mesma transmissão. 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 todos esses pontos formam um hiperboloide com A e B como focos. Três pares independentes de quatro

receptores dão três hiperboloides, que se cruzam na aeronave. É o problema dos satélites com conhecido e desconhecido trocados: lá, um receptor e quatro transmissores conhecidos; aqui, um transmissor e quatro receptores conhecidos. Nos dois, o que se mede é tempo, e 1 microssegundo são 300 m. Os receptores sincronizam os seus relógios a cerca de 100 ns a partir dos mesmos satélites que a aeronave usa.

Você pode fazer isso com som. Três pessoas com cronômetros em pontos medidos de um campo; uma quarta, escondida, bate palma uma vez; cada uma registra o atraso. Com o som a 343 m/s, uma diferença de 0,1 s são 34 m, e um desenho em escala com posições de teste, ou um esboço das hipérboles, encontra quem bateu palma. Depois pergunte que precisão os cronômetros precisariam ter para fazer o mesmo com rádio ao longo de 200 km, e você vai entender por que a rede precisa de tempo atômico.

AULA 3

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

O transponder envia o ADS-B como um squitter estendido Mode S: um preâmbulo de 8 microssegundos, depois 112 bits de dados a um bit por microssegundo. O preâmbulo é um padrão fixo de quatro pulsos em 0, 1, 3,5 e 4,5 microssegundos, e o seu trabalho é responder a uma pergunta que talvez você não tenha pensado em fazer: num canal cheio de ruído e de outras aeronaves, como um receptor sabe que uma mensagem começou, e quando cada bit começa? O decodificador vigia continuamente esse padrão, e quando o vê, sabe as duas coisas. Todo protocolo digital que você usa, do Wi-Fi a um código QR, tem um equivalente.

Um transmissor pode estar ligado ou desligado; como ele envia 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 metades: um pulso na primeira metade e silêncio na segunda é um 1; silêncio e depois um pulso é um 0. Há sempre exatamente um pulso por bit. Pense por que isso é melhor do que "pulso significa 1, ausência de pulso significa 0". O receptor nunca perde a sua sincronização, mesmo ao longo de uma longa sequência de zeros, que no esquema ingênuo seria indistinguível do silêncio. E ele decide cada bit perguntando qual metade foi mais forte, em vez de se um pulso ultrapassou algum nível fixo, de modo que um sinal fraco vindo de 400 km é decodificado com a mesma confiabilidade que um forte vindo de cima da cabeça.

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



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

Os 112 bits são organizados da seguinte forma, e você deve conseguir reproduzir isso de memória. Bits 1 a 5: o formato de downlink, 17 para ADS-B vindo de um transponder. Bits 6 a 8: um código de capacidade. Bits 9 a 32: o endereço ICAO de 24 bits, a identidade permanente da aeronave, atribuída no registro; existem $2^{24} = 16.777.216$ deles, alocados aos Estados em blocos, sendo o da Bélgica de 448000 a 44FFFF em hexadecimal. Bits 33 a 88: o campo de mensagem de 56 bits, cujos cinco

primeiros bits, o código de tipo, dizem o que os outros 51 contêm. Os códigos de tipo 1 a 4 carregam o indicativo de chamada como oito caracteres de 6 bits, 64 símbolos cada. Os códigos de tipo 9 a 18 carregam uma posição em voo: 12 bits de altitude barométrica em passos de 25 pés, um sinalizador par/ímpar e 17 bits cada de latitude e longitude codificadas. O código de tipo 19 carrega a velocidade como componentes leste-oeste e norte-sul da velocidade em relação ao solo, a razão vertical e a diferença entre as alturas barométrica e geométrica. Bits 89 a 112: a paridade de 24 bits. Confira a aritmética: 12 bits de altitude a 25 pés cobrem 102.400 pés; 17 bits usados ingenuamente sobre 180 graus de latitude resolveriam apenas 1,4 km. A posição é melhor do que isso por causa do relato compacto de posição: os 17 bits dão a posição dentro de uma zona com precisão de poucos metros, não qual é a zona, e a aeronave alterna entre duas grades de zonas, par e ímpar. Um receptor que ouviu uma de cada resolve a zona sem ambiguidade e depois rastreia a partir de mensagens isoladas. Mais precisão dos mesmos bits, comprada com tempo.

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

Disseque a mensagem real do topo desta página. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 tem 28 dígitos hexadecimais, 112 bits. Os dois primeiros dígitos, 8D, são 1000 1101 em binário; os cinco primeiros bits, 10001, são 17, então isto é ADS-B vindo de um transponder, e os três seguintes, 101, dão capacidade 5. Os seis dígitos seguintes, 4840D6, são o endereço ICAO, que as tabelas de alocação situam nos Países Baixos. O par de dígitos seguinte, 20, começa 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 seis dígitos finais, 576098, são a paridade. Com uma planilha ou algumas linhas de código, você consegue fazer toda a decodificação, e ser capaz de olhar para uma linha de hexadecimais e dizer "uma aeronave da KLM anunciando o voo 1023" é o objetivo desta aula.

A paridade merece a maior reflexão. Sobre um aeroporto movimentado, transmissões de aeronaves diferentes se sobrepõem num receptor constantemente, e pulsos isolados se perdem no ruído; um decodificador inevitavelmente montará bits errados às vezes. Os últimos 24 bits são uma verificação de redundância cíclica: os 88 bits da mensagem são tratados como um único número binário longo e divididos, numa aritmética em que a subtração é o ou-exclusivo, por um polinômio gerador fixo de 25 bits; o resto é o CRC. O receptor repete a divisão sobre os bits que decodificou. Qualquer bit invertido isolado, quaisquer dois, e qualquer rajada de erros de até 24 bits de comprimento muda o resto, e a mensagem é rejeitada. Experimente um CRC de 4 bits sobre uma mensagem de 8 bits à mão para ver o mecanismo; depois, se você programa, implemente o CRC-24 real e verifique que a mensagem de exemplo passa e que inverter qualquer bit a faz falhar. Isso é detecção de erros como todo sistema moderno a faz, num contexto em que um erro não detectado poderia colocar uma aeronave fantasma na tela de um controlador.

AULA 4

Alcance: a curva da Terra e a lei do inverso do quadrado

A que distância um receptor consegue ouvir uma aeronave? Dois limites diferentes se aplicam, e vale a pena mantê-los separados. O primeiro é geométrico. Em 1090 MHz, o rádio não se curva ao redor da Terra; ele viaja em linha reta, de modo que um receptor ouve apenas aeronaves acima do seu horizonte, aquelas a partir das quais uma linha reta até a antena passa livre do chão. Deduza a distância do horizonte. 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 e os dois raios formam um ângulo reto no ponto de tangência, de modo que $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, o que dá $d^2 = 2Rh + h^2$, e como h é desprezível diante de R , $d = \sqrt{2Rh}$. Com $R = 6.371$ km e h em metros, d (km) = $3,57 \sqrt{h}$. A atmosfera curva o rádio ligeiramente para baixo porque o seu índice de refração cai com a altura; a correção padrão trata a Terra como tendo 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: 149 km. Aeronave numa pista a 30 km: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27$ km, portanto silenciosa.



Trace d em função de h_2 para a altura da sua própria antena. A curva é íngreme no início e depois achata, e explica a forma da cobertura de todo receptor: 400 km ou mais para o tráfego em cruzeiro, algumas dezenas de quilômetros para aeronaves em aproximação, nada no solo exceto no aeroporto ao lado. Ela explica por que a altura é a propriedade mais importante de um receptor, e por que um morro, um prédio ou a própria asa da aeronave ao inclinar para longe pode cortar uma trajetória instantaneamente.

O segundo limite é a energia. Um transponder irradia algumas centenas de watts, de modo aproximadamente uniforme em todas as direções horizontais. À distância d , essa potência está espalhada 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 você deve deduzir a partir da área da esfera em vez de memorizar. Duas vezes mais longe, um quarto da potência; dez vezes, um centésimo. Os engenheiros expressam a perda em decibéis, em que 10 dB é um fator de dez em potência e 3 dB um fator de dois, porque os decibéis transformam a multiplicação através de muitas ordens de grandeza em adição. A perda de percurso no espaço livre entre duas antenas simples 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: $52,0 + 60,7 + 32,4 = 145$ dB. Um transmissor de 250 W é +54 dBm; potência recebida $54 - 145 = -91$ dBm, cerca de 8×10^{-13} W.

Vale a pena parar nesse número: um receptor num telhado está detectando um sinal $10^{14,5}$ vezes mais fraco do que aquele que saiu da aeronave, um milionésimo de milionésimo de watt. Um bom receptor de hobby decodifica até cerca de -100 dBm, de modo que há 9 dB de folga a 400 km. Em outras palavras, o limite energético e o horizonte geométrico para um avião de passageiros em cruzeiro caem no mesmo lugar, e isso é de propósito: a potência do transponder e as normas dos receptores foram especificadas de modo que uma aeronave seja audível até o seu horizonte e não muito além, o que impede que o canal seja inundado pelo tráfego do país vizinho.

Dois refinamentos. Doppler: uma aeronave se aproximando a 250 m/s desloca a frequência recebida em $f_v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Hz, menos de uma parte por milhão, o que um receptor nunca nota; compare com o som da mesma aeronave, em que v / c é $250 / 343$ e a altura do som cai quase uma oitava quando ela passa. E o tempo de voo: 400 km a c são 1,33 ms, de modo que a posição transmitida já tem 1,33 ms de idade ao chegar, tempo em que a aeronave se moveu 33 cm; desprezível para um mapa, decisivo para a multilateração, que vive exatamente desses microssegundos.

AULA 5

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, e o mesmo dispositivo, alimentado por uma corrente, lança uma onda; antenas receptoras e transmissoras são a mesma coisa operando ao contrário. A corrente induzida é máxima na ressonância, quando o comprimento do condutor permite que a distribuição de corrente ao longo dele se encaixe na oscilação da onda, como uma corda do comprimento certo ressoa com uma nota específica. A ressonância fundamental de um condutor reto está em meio comprimento de onda, 13,75 cm em 1090 MHz, com a corrente máxima no centro e nula nas extremidades. A antena ADS-B prática, nas aeronaves e na maioria dos receptores, é um monopolo de um quarto de onda: um elemento vertical de 6,9 cm sobre um plano de terra condutor, que o espelha 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. Uma antena caseira fica dessintonizada com alguns milímetros de erro e ouve uma fração do céu: por isso o receptor do projeto usa uma antena sintonizada de fábrica.

Um monopolo vertical é mais sensível na direção do horizonte e nada sensível ao longo do próprio eixo; a sua sensibilidade em três dimensões é uma rosquinha com a antena atravessando o buraco. Por isso o seu receptor vai ouvir aeronaves a 300 km perfeitamente e perder por alguns segundos uma que passa diretamente acima, e você pode ver isso acontecer. Uma antena colinear, vários elementos ressonantes empilhados, achata a rosquinha e aumenta a sensibilidade no horizonte à custa do buraco vertical: isso é o ganho de antena, medido em dBi, e ele vem de redistribuir a sensibilidade, nunca de criá-la. E, da aula 1, a antena precisa estar na vertical, porque a onda é polarizada verticalmente.

Entre a antena e um ponto no mapa há quatro estágios. Um filtro passa-faixa deixa passar 1090 MHz e rejeita os sinais de telefonia celular, muito mais fortes, a algumas centenas de megahertz de distância, que de outro modo saturariam tudo depois dele. Um amplificador de baixo ruído junto à antena multiplica o sinal mil vezes antes do cabo, que em 1090 MHz perde cerca de 3 dB, metade do sinal, a cada dez metros; amplifique depois do cabo e você amplifica o ruído do cabo também. Um rádio definido por software, um dispositivo USB de 20 euros originalmente vendido como sintonizador de televisão, mistura o sinal para baixo e o amostra dois milhões de vezes por segundo, gerando um fluxo de números. Daqui em diante é programação: um software livre varre as amostras em busca 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 pareia quadros de posição pares e ímpares, funde posição, velocidade e identidade pelo endereço ICAO e mantém o estado de cada aeronave até que as mensagens parem de chegar, geralmente porque ela desceu abaixo do horizonte.

Desenhe essa cadeia, com a grandeza em cada estágio: nanovolts na antena, microvolts depois do amplificador, dois milhões de amostras por segundo saindo do rádio, algumas centenas de quadros por segundo saindo do decodificador, um registro por aeronave saindo do rastreador. Um ponto no mapa é a extremidade de uma cadeia em que cada elo é uma ideia deste curso: ressonância, filtragem, amplificação, amostragem, reconhecimento de padrões, decodificação, verificação de erros, agregação. O projeto é montar a cadeia e testar o curso contra o céu: meça o seu alcance máximo em função da altitude e compare com a fórmula do horizonte; compare a antena dentro de casa, numa janela e no telhado, na vertical e na horizontal; registre um dia de tráfego e encontre a hora mais movimentada e a altitude de cruzeiro típica; decodifique mensagens brutas e verifique o seu CRC no seu próprio código. E depois faça as perguntas que o sistema levanta e não responde: as mensagens não são assinadas, então o que impede alguém de difundir uma aeronave fantasma; a aeronave depende de satélites que podem sofrer interferência, então o que o controlador vê quando isso acontece; e os dados identificam aeronaves, que podem identificar pessoas, então quem deveria poder seguir quem.

Desafios

Resolva cada um no papel primeiro. A verificação mostra a resposta e o raciocínio.

- 1. Qual é o comprimento de onda do sinal de 1090 MHz, e que comprimento tem uma antena de um quarto de onda para ele?**
- 2. Quantas vezes mais rápida do que o som é a mensagem? Uma aeronave a 30 km emite as duas coisas ao mesmo tempo; quanto ela já voou quando o som chega?**
- 3. O relógio de um receptor está errado em 2 microssegundos. Que erro de distância isso causa, e por que um receptor de satélite precisa de quatro satélites em vez de três?**
- 4. Quantas aeronaves 24 bits de endereço conseguem identificar? Quanto dura uma mensagem de 112 bits a 1 bit por microssegundo, e a transmissão inteira com o seu preâmbulo?**

5. 5. Na mensagem 8D4840D6..., quais são o formato de downlink e a capacidade, e qual é o endereço ICAO?

6. 6. Uma antena receptora está a 15 m de altura. Qual é o horizonte de rádio até uma aeronave a 9.000 m, e até uma a 300 m?

7. 7. Por que dobrar a distância reduz a potência recebida a um quarto? Qual é a perda de percurso a 200 km, e como ela se compara com os 145 dB a 400 km?

8. 8. Preveja o que acontece com o alcance se a antena for deitada na horizontal, e se o receptor for levado do telhado para o térreo.

A SEGUIR

Monte você mesmo

Tudo o que está nestas aulas pode ser verificado de uma janela. A oficina prática dá a você a lista de compras (cerca de 100 a 150 euros, ou um Raspberry Pi que você já tenha), a antena a escolher e onde colocá-la, os três comandos que instalam o feeder da Dataero e as medições que testam as fórmulas contra aeronaves reais: o horizonte de rádio, a lei do inverso do quadrado, o ritmo diário. Quando o seu receptor alimenta o mapa, cada aeronave que ele ouve é desenhada para todo mundo, com o nome da sua estação.

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

Respostas

1. 1. Qual é o comprimento de onda do sinal de 1090 MHz, e que comprimento tem uma antena de um quarto de onda para ele?
 $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275 \text{ m}$. Um elemento de um quarto de onda tem 6,9 cm. A velocidade fixa da luz força frequência e comprimento de onda a serem inversamente relacionados.
2. 2. Quantas vezes mais rápida do que o som é a mensagem? Uma aeronave a 30 km emite as duas coisas ao mesmo tempo; quanto ela já voou quando o som chega?
 $3,00 \times 10^8 / 343 = \text{cerca de } 875.000 \text{ vezes}$. A mensagem chega em 100 microssegundos, o som em 87 s, tempo em que a aeronave a 250 m/s voa 22 km.
3. 3. O relógio de um receptor está errado em 2 microssegundos. Que erro de distância isso causa, e por que um receptor de satélite precisa de quatro satélites em vez de três?
 $2 \times 10^{-6} \text{ s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 600 \text{ m}$. Três satélites fixam x, y e z somente se o relógio for perfeito; o desvio do relógio é uma quarta incógnita, então é preciso um quarto satélite.
4. 4. Quantas aeronaves 24 bits de endereço conseguem identificar? Quanto dura uma mensagem de 112 bits a 1 bit por microssegundo, e a transmissão inteira com o seu preâmbulo?
 $2^{24} = 16.777.216$. Os dados duram 112 microssegundos; com o preâmbulo de 8 microssegundos, 120 microssegundos.
5. 5. Na mensagem 8D4840D6..., quais são o formato de downlink e a capacidade, e qual é o endereço ICAO?
8D = 1000 1101. Os cinco primeiros bits, 10001 = 17: DF 17, ADS-B de um transponder Mode S. Os três bits seguintes, 101 = 5: CA 5. O endereço ICAO é 4840D6, alocado aos Países Baixos.
6. 6. Uma antena receptora está a 15 m de altura. Qual é o horizonte de rádio até uma aeronave a 9.000 m, e até uma a 300 m?
 $d = 4,12 \times (\sqrt{15} + \sqrt{9000}) = 4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407 \text{ km}$. Para 300 m: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87 \text{ km}$.
7. 7. Por que dobrar a distância reduz a potência recebida a um quarto? Qual é a perda de percurso a 200 km, e como ela se compara com os 145 dB a 400 km?
A potência transmitida se espalha por uma esfera de área $4 \pi d^2$, que é quatro vezes maior ao dobro da distância. A 200 km: $20 \log_{10}(200) + 20 \log_{10}(1090) + 32,44 = 46,0 + 60,7 + 32,4 = 139 \text{ dB}$, 6 dB (um fator de quatro) a menos do que a 400 km.
8. 8. Preveja o que acontece com o alcance se a antena for deitada na horizontal, e se o receptor for levado do telhado para o térreo.
Horizontal: a antena fica com polarização cruzada em relação à onda vertical; a corrente induzida depende da componente do campo ao longo do condutor, então ela ouve muito pouco. Térreo: o termo de horizonte $4,12 \sqrt{h_1}$ encolhe e os prédios bloqueiam a linha de visada, então o alcance cai bruscamente, sobretudo para aeronaves baixas.