

FIZYKA I INFORMATYKA - WIEK 12-18 LAT

Rozszyfruj niebo

Poniższy ciąg znaków szesnastkowych to prawdziwy komunikat, wysłany przez prawdziwy samolot, który nadaje takie mniej więcej dwa razy na sekundę. W ciągu 112 milionowych sekundy ogłasza, kim jest samolot, a w towarzyszących komunikatach - gdzie jest, jak wysoko i jak szybko leci. Ten kurs omawia wszystko, czego potrzeba, by go zrozumieć: fizykę fali, na której jedzie, pomiar czasu, który daje samolotowi jego położenie, kodowanie, które upycha go w 112 bitach, geometrię, która ogranicza zasięg, z jakiego da się go usłyszeć, oraz odbiornik, który możesz zbudować, by usłyszeć go samodzielnie.

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

SPIS TREŚCI

Czym jest ADS-B - na jednej stronie

LEKCJA 1 Fala: radio jako niewidzialne światło

LEKCJA 2 Czas i położenie: skąd samolot wie, gdzie jest

LEKCJA 3 Komunikat: 112 bitów i jak wychwytuje się błędy

LEKCJA 4 Zasięg: krzywizna Ziemi i prawo odwrotnych kwadratów

LEKCJA 5 Anteny i odbiorniki: od 27-centymetrowej fali do kropki na mapie

Zadania

DALEJ Zbuduj odbiornik

Czym jest ADS-B - na jednej stronie

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

Jeden extended squitter w postaci zapisanej przez odbiornik: 28 cyfr szesnastkowych, 112 bitów. Na lekcji 3 nauczysz się odczytywać każde jego pole.

Kontrola ruchu lotniczego musi bez przerwy wiedzieć, gdzie jest każdy samolot, aby trzymać je z dala od siebie: samolot pasażerski w przelocie pokonuje 250 m na sekundę, a przepisy o separacji wymagają między statkami powietrznymi pod kontrolą radarową 300 m w pionie albo 9 km w poziomie. Przez siedemdziesiąt lat sposobem na tę wiedzę był radar: stacja naziemna wysyła impuls i mierzy czas powrotu echa albo - w ulepszonej, wtórnej odmianie - odpytuje transponder na pokładzie samolotu, który odpowiada na 1090 MHz, podając tożsamość i wysokość. Radar ma ograniczenia: potrzebuje ogromnej mocy, widzi każdy samolot tylko raz na obrót anteny i nie obejmuje oceanów ani gór.

ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (automatyczny zależny dozór - rozgłaszanie), odwraca problem. Każdy nowoczesny samolot ma na pokładzie odbiornik nawigacji satelitarnej i dlatego zna swoje położenie z dokładnością do kilku metrów. ADS-B po prostu każe transponderowi samolotu ogłaszać to położenie razem z tożsamością, wysokością i prędkością, mniej więcej dwa razy na sekundę, na 1090 MHz, do nikogo w szczególności. Automatyczny, bo nic go nie uruchamia; zależny, bo informacje pochodzą wyłącznie z przyrządów samego samolotu; dozór, bo jego celem jest wiedza o tym, gdzie są

samoloty; rozgłaszanie, bo jest wysyłany otwartym tekstem do każdego, kto słucha. Od 2020 roku jest obowiązkowy dla większości statków powietrznych w europejskiej i amerykańskiej przestrzeni powietrznej. Kontrolerzy używają go obok radaru, inne samoloty - by się nawzajem widzieć, a odbiornik USB za 25 euro na dachu szkoły słyszy dokładnie te same komunikaty.

Aby zrozumieć system, musisz zrozumieć pięć rzeczy, a każda z nich to jedna lekcja: falę elektromagnetyczną, która niesie komunikat; pomiar czasu, który daje samolotowi jego położenie i który pozwala sieci zlokalizować samolot niepodający, gdzie jest; cyfrowy komunikat i sposób wychwytywania w nim błędów; geometrię i energię, które ograniczają zasięg, z jakiego da się go usłyszeć; oraz antenę i odbiornik, które z powrotem zamieniają go w dane. Pełny wykład znajdziesz w kursie podstawowym; przeczytaj jego rozdziały 3 i 5 przed lekcją 3, a rozdziały od 6 do 8 przed lekcjami 4 i 5.

LEKCJA 1

Fala: radio jako niewidzialne światło

Komunikat opuszcza samolot jako fala elektromagnetyczna: drgające pola elektryczne i magnetyczne rozchodzące się w przestrzeni bez żadnego ośrodka, z prędkością światła $c = 3,00 \times 10^8$ m/s. Światło widzialne to to samo zjawisko o wyższej częstotliwości; twoje oczy reagują na mniej więcej od 4 do 8×10^{14} Hz, a ADS-B nadaje się na $1,09 \times 10^9$ Hz, czyli pół miliona razy niżej. Między komunikatem samolotu a światłem z tego ekranu nie ma różnicy co do natury, jest tylko różnica częstotliwości.

Ponieważ fala porusza się ze stałą prędkością, jej częstotliwość wyznacza długość fali. W ciągu sekundy fala przesuwa się o c metrów i wykonuje f cykli, więc każdy cykl zajmuje c / f metrów: $c = f \times \lambda$. Dla ADS-B $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. Fala biegnąca między samolotem a twoją anteną ma grzbiety odległe o 27,5 cm, co w widmie umieszcza ją między sygnałem telefonu komórkowego (17 cm) a stacją radiową FM (3 m). Narysuj to widmo samodzielnie, na osi logarytmicznej od 10^6 Hz do 10^{18} Hz, i zaznacz na nim radio FM, ADS-B, telefony komórkowe, Wi-Fi, podczerwień, światło widzialne i promienie rentgenowskie. Fala samolotu leży wśród rzeczy, które nosisz w kieszeni.

$$c = f \times \lambda$$

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

Fala radiowa na pewno nie jest dźwiękiem. Dźwięk to fala ciśnienia w ośrodku, rozchodząca się z prędkością 343 m/s w powietrzu, 1500 m/s w wodzie i wcale w próżni. Radio jest światłem: nie potrzebuje ośrodka - dzięki temu pokonuje próżnię między satelitą a samolotem - i jest szybsze o czynnik $3,00 \times 10^8 / 343$, czyli około 875 000. Jeśli samolot oddalony o 30 km w tej samej chwili wyda dźwięk i wyśle komunikat, komunikat dotrze po 100 mikrosekundach; dźwięk dotrze 87 sekund później, a do tego czasu samolot przeleci 22 km. Fala na linii ma wspólne ze światłem te właściwości, które się liczą - długość fali, częstotliwość i stałą prędkość - więc szybsze potrząsanie daje krótsze fale, a nie szybsze; różni się tym, że potrzebuje liny.

Jedna właściwość fali będzie ważna na lekcji 5: jej polaryzacja. Pole elektryczne drga w określonym kierunku, prostopadłym do kierunku rozchodzenia się. Anteny samolotów są pionowe, więc fala ADS-B jest spolaryzowana pionowo, a antena odbiorcza położona na boku nie przechwytuje jej prawie wcale - tak jak fala na linie wzbudzona pionowo zostaje zatrzymana przez poziomą szczelinę. Przewidź już teraz, co stanie się z zasięgiem twojego odbiornika, jeśli antena będzie pozioma; sprawdzisz to w projekcie.

LEKCJA 2

Czas i położenie: skąd samolot wie, gdzie jest

Położenie w każdym komunikacie ADS-B pochodzi z nawigacji satelitarnej, a nawigacja satelitarna to pomiar czasu. Około trzydziestu satelitów w każdym systemie (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) krąży na wysokości mniej więcej 20 200 km; każdy ma zegar atomowy i każdy nadaje sygnał podający jego własne położenie i dokładną chwilę nadania. Odbiornik na pokładzie samolotu zapisuje chwilę odbioru. Różnica pomnożona przez c to odległość do tego satelity; z satelity znajdującego się dokładnie w zenicie sygnał biegnie $20\,200 / 300\,000 = 0,0673$ s. Jedna odległość umieszcza odbiornik na sferze wokół satelity; dwie sfery przecinają się wzdłuż okręgu; trzy - w dwóch punktach, z których jeden leży daleko od Ziemi i zostaje odrzucony. Trzy satelity wystarczyłyby, gdyby odbiornik miał idealny zegar. Ma jednak kryształ kwarcu, który rozjeżdża się o mikrosekundy, a jedna mikrosekunda to 300 m odległości. Odbiornik traktuje więc błąd swojego zegara jako czwartą niewiadomą i używa czwartego satelity: cztery równania, cztery niewiadome (x, y, z i przesunięcie zegara), rozwiązywane bez przerwy. Przy okazji każdy odbiornik satelitarny utrzymuje czas z dokładnością do kilkudziesięciu nanosekund, od czego zależy druga połowa tej lekcji.

Zapamiętaj rzędy wielkości: światło pokonuje 0,3 m w nanosekundę i 300 m w mikrosekundę. Położenie z dokładnością do 3 m oznacza pomiar czasu z dokładnością do 10 ns. Satelita, którego zegar spieszyłby się o 1 mikrosekundę, przesunąłby każdy korzystający z niego odbiornik o 300 m wzdłuż linii w swoją stronę - dlatego zegary satelitów są korygowane z ziemi kilka razy dziennie.

Samolot ma dwie wysokości. Rozwiązanie satelitarne daje wysokość geometryczną nad elipsoidą odniesienia. Jednak wysokość, którą samolot nadaje na potrzeby ruchu lotniczego, jest barometryczna: to ciśnienie powietrza w otworze na kadłubie, przeliczone na wysokość według Międzynarodowej Atmosfery Wzorcowej, która zakłada 1013,25 hPa i 15 stopni C na poziomie morza oraz spadek temperatury o 6,5 stopnia na kilometr. Gdy rzeczywiste ciśnienie odbiega od wzorcowego, wysokość barometryczna każdego samolotu jest błędna o tę samą wartość - a separacji potrzeba właśnie tego: dwa samoloty na poziomach lotu 350 i 360 dzieli 1000 ft niezależnie od pogody. Komunikat o położeniu niesie wysokość barometryczną w krokach co 25 stóp; komunikat o prędkości niesie różnicę między wysokością barometryczną a geometryczną. Jeśli masz arkusz kalkulacyjny, odwróć wzór $p = p_0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^{5.255}$ i sprawdź, że na 11 000 m ciśnienie wynosi około 227 hPa, mniej niż ćwierć wartości na poziomie morza: w powietrzu, przez które leci samolot pasażerski, straciłbyś przytomność.

Teraz odwróć całą ideę. Niektóre samoloty nadają na 1090 MHz bez położenia: stare transpondery odpowiadające radarowi tylko tożsamością i wysokością albo samoloty, których odbiór satelitarny jest zagłuszany. Sieć odbiorników nadal może je zlokalizować metodą multilateracji. Załóżmy, że cztery odbiorniki ze zsynchronizowanymi zegarami zapisują czas nadejścia tej samej transmisji. Komunikat, który dotarł do odbiornika A o jedną mikrosekundę wcześniej niż do odbiornika B, został wysłany z punktu położonego o 300 m bliżej A niż B, a wszystkie takie punkty tworzą hiperboloidę o ogniskach A i B. Trzy niezależne pary z czterech odbiorników dają trzy hiperboloidy, które przecinają się w miejscu, gdzie jest samolot. To problem satelitarny z zamienionymi wielkościami znanymi i nieznanymi: tam jeden odbiornik i cztery znane nadajniki; tu jeden nadajnik i cztery znane odbiorniki. W obu przypadkach mierzy się czas, a 1 mikrosekunda to 300 m. Odbiorniki synchronizują zegary z dokładnością do około 100 ns z tych samych satelitów, z których korzysta samolot.

Możesz to zrobić z dźwiękiem. Trzy osoby ze stoperami w wymierzonych punktach boiska; czwarta, schowana, klaszcze raz; każdy zapisuje opóźnienie. Przy prędkości dźwięku 343 m/s różnica 0,1 s to 34 m, a rysunek w skali z próbnymi położeniami albo szkic hiperbol pozwala znaleźć klaszczącego. Potem zapytaj, jakiej dokładności potrzebowałyby stopery, aby zrobić to samo z radiem na odległości 200 km - a zrozumiesz, dlaczego sieć potrzebuje czasu atomowego.

LEKCJA 3

Komunikat: 112 bitów i jak wychwytuje się błędy

Transponder wysyła ADS-B jako extended squitter trybu Mode S: 8-mikrosekundową preambułę, a po niej 112 bitów danych w tempie jednego bitu na mikrosekundę. Preambuła to stały wzór czterech impulsów w chwilach 0; 1; 3,5 i 4,5 mikrosekundy, a jej zadaniem jest odpowiedź na pytanie, którego mogłeś nawet nie pomyśleć zadać: skąd odbiornik w kanale pełnym szumu i innych samolotów wie, że zaczął się komunikat i kiedy zaczyna się każdy bit? Dekoder bez przerwy wypatruje tego wzoru, a gdy go zobaczy, wie jedno i drugie. Każdy protokół cyfrowy, którego używasz, od Wi-Fi po kod QR, ma swój odpowiednik.

Nadajnik może być włączony albo wyłączony; jak więc wysyła 1 albo 0? ADS-B stosuje modulację położenia impulsu. Każda jednomikrosekundowa szczelina bitu dzieli się na połowy: impuls w pierwszej połowie i cisza w drugiej to 1; cisza, a potem impuls to 0. Na każdy bit przypada zawsze dokładnie jeden impuls. Zastanów się, dlaczego to lepsze niż „impuls oznacza 1, brak impulsu oznacza 0”. Odbiornik nigdy nie traci synchronizacji, nawet przy długim ciągu zer, który w naiwnym schemacie byłby nie do odróżnienia od ciszy. A o każdym bicie decyduje, sprawdzając, która połowa była głośniejsza, a nie czy impuls przekroczył jakiś stały poziom - więc słaby sygnał z 400 km dekoduje się równie pewnie jak silny sygnał z samolotu tuż nad głową.

Cztery bity w modulacji położenia impulsu: 1, 0, 1, 1



Każda szczelina trwa 1 mikrosekundę. Impuls w pierwszej połowie: 1. Impuls w drugiej połowie: 0.

112 bitów jest ułożonych następująco - i powinieneś umieć odtworzyć to z pamięci. Bity od 1 do 5: format łącza w dół (downlink format), 17 dla ADS-B z transpondera. Bity od 6 do 8: kod możliwości. Bity od 9 do 32: 24-bitowy adres ICAO, stała tożsamość samolotu, nadawana przy rejestracji; istnieje ich $2^{24} = 16\,777\,216$, przydzielanych państwom w blokach - Belgii przypadł zakres od 448000 do 44FFFF w zapisie szesnastkowym. Bity od 33 do 88: 56-bitowe pole komunikatu, którego pierwsze pięć bitów, kod typu, mówi, co zawiera pozostałe 51. Kody typu od 1 do 4 niosą znak wywoławczy jako osiem 6-bitowych znaków, po 64 symbole każdy. Kody typu od 9 do 18 niosą położenie w powietrzu: 12 bitów wysokości barometrycznej w krokach co 25 stóp, znacznik parzysty/nieparzysty oraz po 17 bitów zakodowanej szerokości i długości geograficznej. Kod typu 19 niesie prędkość jako składowe prędkości względem ziemi wschód-zachód i północ-południe, prędkość pionową oraz różnicę między wysokością barometryczną a geometryczną. Bity od 89 do 112: 24-bitowa parzystość. Sprawdź rachunek: 12 bitów wysokości po 25 ft obejmuje 102 400 ft; 17 bitów użytych naiwnie na 180 stopni szerokości

geograficznej datoby rozdzielczość zaledwie 1,4 km. Położenie jest dokładniejsze dzięki kompaktowemu raportowaniu położenia (CPR): 17 bitów podaje położenie wewnątrz strefy z dokładnością do kilku metrów, ale nie mówi, która to strefa, a samolot naprzemiennie korzysta z dwóch siatek stref, parzystej i nieparzystej. Odbiornik, który usłyszał po jednym komunikacie z każdej, jednoznacznie ustala strefę, a potem śledzi samolot na podstawie pojedynczych komunikatów. Więcej precyzji z tych samych bitów, okupione czasem.

DF	CA	adres ICAO	ME - treść komunikatu	PI
5 bity format łączy w dół	3 bity możliwości	24 bity unikalna tożsamość samolotu	56 bity położenie, wysokość, prędkość, znak wywoławczy lub status, zależnie od kodu typu w pierwszych 5 bitach	24 bity kontrola błędów (CRC)

Rozbierz na części prawdziwy komunikat z góry tej strony. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 to 28 cyfr szesnastkowych, 112 bitów. Pierwsze dwie cyfry, 8D, to dwójkowo 1000 1101; pierwsze pięć bitów, 10001, to 17, więc jest to ADS-B z transpondera, a kolejne trzy, 101, dają możliwości 5. Następne sześć cyfr, 4840D6, to adres ICAO, który według tabel przydziału należy do Holandii. Kolejna para cyfr, 20, zaczyna się od 00100, czyli kodu typu 4 - komunikatu identyfikacyjnego - a zdekodowanie kolejnych 6-bitowych znaków daje znak wywoławczy KLM1023. Ostatnie sześć cyfr, 576098, to parzystość. Za pomocą arkusza kalkulacyjnego albo kilku linijek kodu możesz przeprowadzić całe dekodowanie, a celem tej lekcji jest to, byś umiał spojrzeć na linijkę cyfr szesnastkowych i powiedzieć: „samolot KLM ogłaszający lot 1023”.

Parzystość wymaga najwięcej namysłu. Nad ruchliwym lotniskiem transmisje różnych samolotów nieustannie nakładają się na siebie w odbiorniku, a pojedyncze impulsy giną w szumie; dekodery nieuchronnie czasem złoży błędne bity. Ostatnie 24 bity to cykliczna kontrola nadmiarowa (CRC): 88 bitów komunikatu traktuje się jako jedną długą liczbę dwójkową i dzieli - w arytmetyce, w której odejmowanie to alternatywa wykluczająca (XOR) - przez stały 25-bitowy wielomian generujący; reszta z dzielenia to CRC. Odbiornik powtarza dzielenie na zdekodowanych bitach. Każdy pojedynczy odwrócony bit, każde dwa i każda seria błędów o długości do 24 bitów zmienia resztę, a komunikat zostaje odrzucony. Spróbuj ręcznie policzyć 4-bitowe CRC dla 8-bitowego komunikatu, aby zobaczyć mechanizm, a potem, jeśli programujesz, zaimplementuj prawdziwe CRC-24 i sprawdź, że przykładowy komunikat przechodzi kontrolę, a odwrócenie dowolnego jednego bitu sprawia, że jej nie przechodzi. Tak wykrywa błędy każdy nowoczesny system - tu w kontekście, w którym przeoczony błąd mógłby umieścić na ekranie kontrolera samolot-widmo.

LEKCJA 4

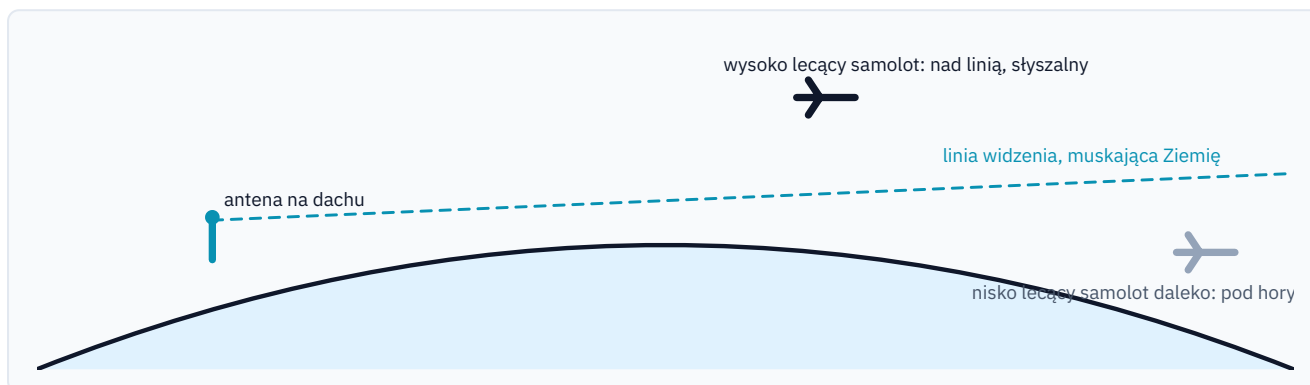
Zasięg: krzywizna Ziemi i prawo odwrotnych kwadratów

Z jak daleka odbiornik może usłyszeć samolot? Obowiązują dwa różne ograniczenia i warto je rozróżnić. Pierwsze jest geometryczne. Na 1090 MHz fale radiowe nie zakrzywiają się wokół Ziemi; biegną po liniach prostych, więc odbiornik słyszy tylko samoloty nad swoim horyzontem - te, od których prosta linia do anteny nie zahacza o ziemię. Wyprowadź odległość do horyzontu. Antena na wysokości h nad kulą o promieniu R widzi horyzont tam, gdzie jej linia widzenia jest styczna do kuli; styczna i promień tworzą w punkcie styczności kąt prosty, więc $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, skąd $d^2 = 2Rh + h^2$, a ponieważ h jest pomijalne w porównaniu z R , $d = \sqrt{2Rh}$. Dla $R = 6371$ km i h w metrach d (km) = $3,57 \sqrt{h}$.

Atmosfera lekko zagina fale radiowe w dół, bo jej współczynnik załamania maleje z wysokością; standardowa poprawka traktuje Ziemię tak, jakby miała cztery trzecie swojego rzeczywistego promienia, co zastępuje 3,57 przez 4,12. Pełna linia widzenia od anteny na wysokości h_1 do samolotu na wysokości h_2 to suma dwóch odległości do horyzontu:

$$d \text{ (km)} = 4,12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad h_1, h_2 \text{ w metrach}$$

Antena na dachu o wysokości 20 m, samolot na 11 000 m: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451 \text{ km}$. Ta sama antena, samolot na 1000 m: 149 km. Samolot na pasie startowym 30 km dalej: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27 \text{ km}$, więc niesłyszalny.



Narysuj wykres d w zależności od h_2 dla wysokości twojej własnej anteny. Krzywa najpierw rośnie stromo, a potem się spłaszcza, i wyjaśnia kształt zasięgu każdego odbiornika: 400 km i więcej dla ruchu przelotowego, kilkadziesiąt kilometrów dla samolotów podchodzących do lądowania, nic na ziemi poza najbliższym lotniskiem. Wyjaśnia, dlaczego wysokość jest najważniejszą cechą odbiornika i dlaczego wzgórze, budynek albo skrzydło samego samolotu w przechyle mogą natychmiast przerwać ślad.

Drugim ograniczeniem jest energia. Transponder wypromieniowuje kilkaset watów, mniej więcej równomiernie we wszystkich kierunkach poziomych. W odległości d ta moc rozkłada się na sferę o powierzchni $4\pi d^2$, więc moc przechwytywana przez antenę o stałej powierzchni skutecznej spada jak $1/d^2$: to prawo odwrotnych kwadratów, które warto wyprowadzić z pola powierzchni sfery, zamiast uczyć się go na pamięć. Dwa razy dalej - ćwierć mocy; dziesięć razy dalej - setna część. Inżynierowie wyrażają straty w decybelach, gdzie 10 dB to dziesięciokrotność mocy, a 3 dB to dwukrotność, bo decybele zamieniają mnożenie w zakresie wielu rzędów wielkości na dodawanie. Tłumienie w wolnej przestrzeni między dwiema prostymi antenami wynosi:

$$\text{tłumienie trasy (dB)} = 20 \log_{10}(d \text{ w km}) + 20 \log_{10}(f \text{ w MHz}) + 32,44$$

Dla 400 km i 1090 MHz: $52,0 + 60,7 + 32,4 = 145 \text{ dB}$. Nadajnik 250 W to +54 dBm; moc odebrana $54 - 145 = -91 \text{ dBm}$, około $8 \times 10^{-13} \text{ W}$.

Przy tej liczbie warto się zatrzymać: odbiornik na dachu wykrywa sygnał $10^{14,5}$ razy słabszy od tego, który opuścił samolot - milionową część milionowej części wata. Dobry amatorski odbiornik dekoduje sygnały do około -100 dBm, więc na 400 km zostaje 9 dB zapasu. Innymi słowy, granica energetyczna i horyzont geometryczny dla samolotu pasażerskiego w przelocie wypadają w tym samym miejscu - i to celowo: moc transponderów i normy dla odbiorników określono tak, by samolot był słyszalny do swojego horyzontu i niewiele dalej, co chroni kanał przed zalaniem ruchem z sąsiedniego kraju.

Dwa uzupełnienia. Efekt Dopplera: samolot zbliżający się z prędkością 250 m/s przesuwają odbieraną częstotliwość o $f_v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Hz, mniej niż jedna milionowa, czego odbiornik nigdy nie zauważa; porównaj to z dźwiękiem tego samego samolotu, gdzie v / c wynosi 250 / 343, a wysokość tonu spada podczas przelotu prawie o oktawę. Oraz czas przelotu sygnału: 400 km z prędkością c to 1,33 ms, więc nadane położenie w chwili odbioru ma już 1,33 ms, a w tym czasie samolot przesunął się o 33 cm; to pomijalne dla mapy, ale decydujące dla multilateracji, która żyje właśnie z tych mikrosekund.

LEKCJA 5

Anteny i odbiorniki: od 27-centymetrowej fali do kropki na mapie

Antena to przewodnik, w którym przechodząca fala elektromagnetyczna indukuje prąd przemienny, a to samo urządzenie zasilane prądem wysyła falę; anteny odbiorcze i nadawcze to jedno i to samo, tylko działające w przeciwnym kierunku. Indukowany prąd jest największy przy rezonansie, gdy długość przewodnika pozwala, by rozkład prądu wzdłuż niego pasował do drgań fali - tak jak struna o odpowiedniej długości rezonuje z określonym dźwiękiem. Podstawowy rezonans prostego przewodnika występuje przy połowie długości fali, czyli 13,75 cm dla 1090 MHz, przy czym prąd jest największy w środku, a zerowy na końcach. Praktyczna antena ADS-B, zarówno na samolotach, jak i w większości odbiorników, to ćwierćfalowy monopol: pionowy element o długości 6,9 cm na przewodzącej płaszczyźnie uziemienia, która tworzy jego odbicie lustrzane, tak że element i jego obraz razem tworzą półfalowy dipol. Na samolocie płaszczyzną uziemienia jest kadłub; kupiona antena 1090 MHz kryje tę samą geometrię wewnątrz swojej tuby, powtórzoną kilka razy jedna nad drugą. Antenę domowej roboty rozstraja kilka milimetrów błędu i słyszy ona tylko ułamek nieba - dlatego odbiornik z projektu korzysta z anteny dostrojonej fabrycznie.

Pionowy monopol jest najczulszy w kierunku horyzontu, a wcale nie wzdłuż własnej osi; jego czułość w trzech wymiarach ma kształt obwarzanka z anteną przechodzącą przez dziurę. Twój odbiornik będzie więc doskonale słyszał samoloty oddalone o 300 km, a na kilka sekund zgubi taki, który przelatuje dokładnie nad głową - i możesz to zaobserwować. Antena kolinearna, czyli kilka elementów rezonansowych ustawionych jeden nad drugim, spłaszczają obwarzanek i zwiększa czułość przy horyzoncie kosztem dziury nad głową: to zysk anteny, mierzony w dBi, i bierze się on z przesunięcia czułości, nigdy z jej tworzenia. I, jak wiesz z lekcji 1, antena musi być pionowa, bo fala jest spolaryzowana pionowo.

Między anteną a kropką na mapie są cztery etapy. Filtr pasmowy przepuszcza 1090 MHz i odcina dużo silniejsze sygnały telefonii komórkowej oddalone o kilkadziesiąt megaherców, które inaczej nasyciłyby wszystko za nim. Wzmacniacz niskoszumowy przy antenie mnoży sygnał tysiąckrotnie przed kablem, który na 1090 MHz traci około 3 dB, czyli połowę sygnału, na każde dziesięć metrów; jeśli wzmocnisz sygnał za kablem, wzmocnisz też szum kabla. Radio programowalne (SDR), urządzenie USB za 20 euro, pierwotnie sprzedawane jako tuner telewizyjny, przenosi sygnał na niższą częstotliwość i próbuje go dwa miliony razy na sekundę, zamieniając w strumień liczb. Od tego miejsca to już programowanie: darmowe oprogramowanie przeszukuje próbki w poszukiwaniu preambuły, mierzy, która połowa każdej mikrosekundowej szczeliny niesie więcej energii, składa 112 bitów, oblicza CRC i - jeśli kontrola wypadnie pomyślnie - dekoduje pola. Następnie moduł śledzący łączy w pary parzyste i nieparzyste

ramki położenia, scala położenie, prędkość i tożsamość według adresu ICAO i przechowuje stan każdego samolotu, dopóki przestaną przychodzić komunikaty - zwykle dlatego, że samolot zszedł poniżej horyzontu.

Narysuj ten łańcuch, z wielkością na każdym etapie: nanowolty na antenie, mikrowolty za wzmacniaczem, dwa miliony próbek na sekundę z radia, kilkaset ramek na sekundę z dekodera, jeden rekord na samolot z modułu śledzącego. Kropka na mapie to drugi koniec łańcucha, w którym każde ogniwo to idea z tego kursu: rezonans, filtrowanie, wzmacnianie, próbkowanie, wykrywanie wzorca, dekodowanie, kontrola błędów, agregacja. Projekt polega na zbudowaniu tego łańcucha i sprawdzeniu kursu na prawdziwym niebie: zmierz swój maksymalny zasięg w zależności od wysokości samolotów i porównaj go ze wzorem na horyzont; porównaj antenę w pomieszczeniu, przy oknie i na dachu, pionowo i poziomo; zapisz dzień ruchu i znajdź najbardziej ruchliwą godzinę oraz typową wysokość przelotową; zdekoduj surowe komunikaty i sprawdź ich CRC we własnym kodzie. A potem zadaj pytania, które system stawia, ale na które nie odpowiada: komunikaty nie są podpisane, więc co powstrzymuje kogoś przed nadawaniem samolotu-widma; samolot zależy od satelitów, które można zagłuszyć, więc co widzi wtedy kontroler; a dane identyfikują samoloty, przez co mogą identyfikować ludzi - kto więc powinien móc śledzić kogo.

Zadania

Każde z nich najpierw rozwiąż na papierze. Sprawdzenie pokazuje odpowiedź i tok rozumowania.

1. 1. Jaka jest długość fali sygnału 1090 MHz i jak długa jest dla niego antena ćwierćfalowa?

2. 2. Ile razy szybciej niż dźwięk biegnie komunikat? Samolot oddalony o 30 km wysyła oba jednocześnie; jak daleko przeleci, zanim dotrze dźwięk?

3. 3. Zegar odbiornika myli się o 2 mikrosekundy. Jaki błąd odległości to powoduje i dlaczego odbiornik satelitarny potrzebuje czterech satelitów, a nie trzech?

4. 4. Ile samolotów można zidentyfikować 24 bitami adresu? Jak długo trwa 112-bitowy komunikat przy 1 bicie na mikrosekundę, a jak długo cała transmisja z preambułą?

5. 5. Jaki jest format łącza w dół i kod możliwości w komunikacie 8D4840D6... i jaki jest adres ICAO?

6. 6. Antena odbiorcza jest na wysokości 15 m. Jaki jest horyzont radiowy dla samolotu na 9000 m, a jaki dla samolotu na 300 m?

7. 7. Dlaczego podwojenie odległości zmniejsza odbieraną moc czterokrotnie? Jakie jest tłumienie trasy na 200 km i jak wypada w porównaniu ze 145 dB na 400 km?

8. 8. Przewidź, co stanie się z zasięgiem, jeśli antenę położy się poziomo, a co, jeśli odbiornik przeniesie się z dachu na parter.

DALEJ

Zbuduj odbiornik

Wszystko z tych lekcji można sprawdzić z okna. Warsztat praktyczny daje ci listę zakupów (około 100-150 euro albo Raspberry Pi, które już masz), wybór anteny i miejsce, gdzie ją postawić, trzy polecenia instalujące feeder Dataero oraz pomiary, które sprawdzają wzory na prawdziwych samolotach: horyzont radiowy, prawo odwrotnych kwadratów, dobowy rytm. Kiedy twój odbiornik zasila mapę, każdy samolot, który słyszy, jest rysowany dla wszystkich, z nazwą twojej stacji.

Otwórz warsztat praktyczny <https://radar.dataero.eu/pl/learning/workshop>

Odpowiedzi

1. Jaka jest długość fali sygnału 1090 MHz i jak długa jest dla niego antena ćwierćfalowa?
 $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275 \text{ m}$. Element ćwierćfalowy ma 6,9 cm. Stała prędkość światła sprawia, że częstotliwość i długość fali są do siebie odwrotnie proporcjonalne.
2. Ile razy szybciej niż dźwięk będzie komunikat? Samolot oddalony o 30 km wysyła oba jednocześnie; jak daleko przeleci, zanim dotrze dźwięk?
 $3,00 \times 10^8 / 343 = \text{około } 875\,000 \text{ razy}$. Komunikat dociera po 100 mikrosekundach, dźwięk po 87 s, w ciągu których samolot lecący z prędkością 250 m/s pokonuje 22 km.
3. Zegar odbiornika myli się o 2 mikrosekundy. Jaki błąd odległości to powoduje i dlaczego odbiornik satelitarny potrzebuje czterech satelitów, a nie trzech?
 $2 \times 10^{-6} \text{ s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 600 \text{ m}$. Trzy satelity wyznaczają x, y i z tylko wtedy, gdy zegar jest idealny; przesunięcie zegara to czwarta niewiadoma, więc potrzebny jest czwarty satelita.
4. Ile samolotów można zidentyfikować 24 bitami adresu? Jak długo trwa 112-bitowy komunikat przy 1 bicie na mikrosekundę, a jak długo cała transmisja z preambułą?
 $2^{24} = 16\,777\,216$. Dane trwają 112 mikrosekund; z 8-mikrosekundową preambułą - 120 mikrosekund.
5. Jaki jest format łącza w dół i kod możliwości w komunikacie 8D4840D6... i jaki jest adres ICAO?
8D = 1000 1101. Pierwsze pięć bitów 10001 = 17: DF 17, ADS-B z transpondera Mode S. Kolejne trzy bity 101 = 5: CA 5. Adres ICAO to 4840D6, przydzielony Holandii.
6. Antena odbiorcza jest na wysokości 15 m. Jaki jest horyzont radiowy dla samolotu na 9000 m, a jaki dla samolotu na 300 m?
 $d = 4,12 \times (\sqrt{15} + \sqrt{9000}) = 4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407 \text{ km}$. Dla 300 m: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87 \text{ km}$.
7. Dlaczego podwojenie odległości zmniejsza odbieraną moc czterokrotnie? Jakie jest tłumienie trasy na 200 km i jak wypada w porównaniu ze 145 dB na 400 km?
Nadana moc rozkłada się na sferę o powierzchni $4\pi d^2$, która przy dwukrotnie większej odległości jest cztery razy większa. Na 200 km: $20 \log_{10}(200) + 20 \log_{10}(1090) + 32,44 = 46,0 + 60,7 + 32,4 = 139 \text{ dB}$, czyli o 6 dB (czterokrotnie) mniej niż na 400 km.
8. Przewidź, co stanie się z zasięgiem, jeśli antenę położy się poziomo, a co, jeśli odbiornik przeniesie się z dachu na parter.
Poziomo: antena ma polaryzację skrzyżowaną względem pionowej fali; indukowany prąd zależy od składowej pola wzdłuż przewodnika, więc słyszy bardzo niewiele. Parter: składnik horyzontu $4,12 \sqrt{h_1}$ maleje, a budynki zastaniają linię widzenia, więc zasięg gwałtownie spada, zwłaszcza dla nisko lecących samolotów.