

KURS PODSTAWOWY - DLA KAŻDEGO DOROSŁEGO

Czym jest ADS-B i jak działa

Dwanaście rozdziałów. Nie zakładamy żadnej wcześniejszej wiedzy o lotnictwie ani o radiu; do przykładów obliczeń wystarczy matematyka ze szkoły średniej, a można je pominąć bez gubienia wątku. Czas lektury: około 50 minut.

Nauka - <https://radar.dataero.eu/pl/learning/course> 2026-10-22

SPIS TREŚCI

ROZDZIAŁ 1 Problem: niebo pełne samolotów, których nikt nie widzi

ROZDZIAŁ 2 Przed ADS-B: wykrywanie samolotów radarem

ROZDZIAŁ 3 Idea: niech samolot sam nam powie

ROZDZIAŁ 4 Skąd samolot wie, gdzie jest

ROZDZIAŁ 5 Budowa wiadomości

ROZDZIAŁ 6 - FIZYKA Fala: radio jako niewidzialne światło

ROZDZIAŁ 7 - FIZYKA Zasięg: krzywizna Ziemi i słabnięcie sygnału

ROZDZIAŁ 8 - FIZYKA Anteny: jak złapać falę o długości 27 centymetrów

ROZDZIAŁ 9 Odbiór i dekodowanie

ROZDZIAŁ 10 Od jednego odbiornika do mapy kontynentu

ROZDZIAŁ 11 Do czego służy i gdzie zawodzi

ROZDZIAŁ 12 Krótka historia

Słowniczek

DALEJ Od teorii do praktyki: zbuduj odbiornik

ROZDZIAŁ 1

Problem: niebo pełne samolotów, których nikt nie widzi

W zwykły dzień roboczy przez europejską przestrzeń powietrzną przelatuje około 30 000 lotów. Samolot pasażerski na wysokości przelotowej porusza się z prędkością mniej więcej 250 metrów na sekundę, czyli 900 km/h; dwa samoloty lecące naprzeciw siebie zbliżają się o pół kilometra co sekundę. Pilot wyglądający przez okno nie widzi z tego prawie nic: na wysokości 10 000 metrów inne samoloty są ledwie punkcikami, a większość i tak zastaniają chmury. Niebo to trójwymiarowa sieć dróg, na której nie namalowano żadnych pasów, a ruch na niej jest zarazem szybki i niewidoczny.

Kontrola ruchu lotniczego istnieje po to, by ten ruch rozdzielać. Zasady są w teorii proste: w kontrolowanej przestrzeni powietrznej samoloty utrzymuje się w odstępie co najmniej 1000 stóp (około 300 metrów) w pionie albo w określonej odległości w poziomie, zwykle 5 mil morskich (9,3 km) w zasięgu radaru i znacznie większej nad oceanami. Aby stosować te zasady, kontroler musi stale i niezawodnie znać pozycję każdego samolotu w swoim sektorze: nie tę sprzed minuty, lecz obecną, a także jego wysokość i kierunek lotu. Cały ten kurs jest o tym, jak tę wiedzę się zdobywa. Fachowo nazywa się to **dozorowaniem**.

Liczba, którą warto zapamiętać

Przy 900 km/h samolot pokonuje 15 km w minutę i 250 m w sekundę. Każda metoda dozoru, która aktualizuje dane powoli albo z dużym błędem, zostawia kontrolera w niepewności dokładnie na tych odległościach, które mają znaczenie.

ROZDZIAŁ 2**Przed ADS-B: wykrywanie samolotów radarem**

Pierwszą odpowiedzią, opracowaną pod koniec lat 30. i dopracowaną podczas II wojny światowej, był **radar pierwotny**. Duża obracająca się antena wysyła krótki, bardzo silny impuls energii radiowej. Gdy impuls trafi w samolot, drobna jego część odbija się z powrotem. Radar mierzy czas między wystąpieniem impulsu a powrotem echa; ponieważ fale radiowe biegną z prędkością światła, 300 000 km/s, czas daje odległość. Kierunek, w który była zwrócona antena, daje azymut. Radar pierwotny jest wspaniale niezależny: samolot nie potrzebuje żadnego wyposażenia, dlatego nadal używa go wojsko. Ma jednak poważne słabości. Echo od odległego samolotu jest niezwykle słabe, więc nadajnik musi być ogromny. Echo nic nie mówi o tym, jaki to samolot ani jak wysoko leci. A antena potrzebuje kilku sekund na pełny obrót, więc każdy samolot jest widoczny tylko raz na 4 do 12 sekund, a w tym czasie przemieszcza się nawet o 3 km.

Druga odpowiedź, **radar wtórny** (SSR, secondary surveillance radar), uczyniła z samolotu uczestnika. Stacja naziemna wysyła pytanie, tzw. *zapytanie*, na częstotliwości 1030 MHz. Małe radio na pokładzie, **transponder**, słyszy pytanie i odpowiada na 1090 MHz własnym silnym sygnałem. Ponieważ odpowiedź jest nadawana, a nie odbita, jest miliony razy silniejsza niż echo radarowe, a ponieważ generuje ją komputer, może przenosić informacje. W najstarszej formie (Mode A) odpowiedź zawiera czterocyfrowy kod identyfikacyjny przydzielony przez kontrolera; w Mode C także wysokość samolotu. W latach 80. pojawił się **Mode S** („S” od selective, czyli selektywny), w którym każdy transponder ma unikalny 24-bitowy adres, może być odpytany indywidualnie i może odpowiadać 56- lub 112-bitowymi wiadomościami z danymi. Zapamiętaj tę liczbę, 1090 MHz, i to słowo, Mode S: ADS-B jest zbudowane bezpośrednio na obu.

Radary wtórne były wielkim postępem, ale nadal dzieli ze swoim poprzednikiem dwa ograniczenia. Samolot mówi tylko wtedy, gdy zostanie zapytany, więc na ziemi wciąż potrzebna jest stacja odpytująca w zasięgu, co wyklucza oceany, pustynie i pasma górskie. A stacja wciąż potrzebuje obracającej się anteny, by wiedzieć, z którego kierunku przyszła odpowiedź, więc każdy samolot nadal jest widoczny tylko raz na obrót, a na ekranie kontrolera wciąż widać punkt, który przeskakuje co kilka sekund, zamiast płynnie poruszającego się samolotu. Aby to poprawić, potrzebne było coś zasadniczo innego: sposób, by samolot zgłaszał swoją pozycję bez pytania i bez konieczności mierzenia cegół z ziemi.

ROZDZIAŁ 3**Idea: niech samolot sam nam powie**

W latach 90. dojrzały dwie technologie, które umożliwiły inne podejście. Nawigacja satelitarna dała każdemu odpowiednio wyposażonemu samolotowi dokładną wiedzę o własnej pozycji, znacznie lepszą niż jakiegokolwiek radar mógłby zmierzyć z ziemi. A transponder Mode S już zapewniał radio zdolne do wysyłania wiadomości z danymi na 1090 MHz. Połącz jedno z drugim, a logika staje się nieodparta:

zamiast żeby ziemia z trudem mierzyła, gdzie jest samolot, niech samolot, który już to wie, po prostu to powie, w regularnych odstępach, wszystkim. To jest ADS-B, a cztery słowa jego nazwy dokładnie je opisują.

Jest **automatyczne** (automatic): nic nie wyzwala transmisji. Transponder nadaje według własnego rytmu, mniej więcej dwa razy na sekundę, niezależnie od tego, czy w zasięgu jest jakaś stacja naziemna i czy pilot cokolwiek robi; w locie pilot nie może tego zatrzymać inaczej niż wyłączając transponder, co jest zabronione. Jest **zależne** (dependent): każda informacja w wiadomości pochodzi z wyposażenia samego samolotu, pozycja z jego odbiornika satelitarnego, a wysokość z jego wysokościomierza ciśnieniowego, ziemia zaś niczego nie mierzy; ufa temu, co usłyszy. Służy do **dozorowania** (surveillance): jego celem jest poinformowanie innych, gdzie jest samolot, na potrzeby kontroli ruchu lotniczego i pobliskich samolotów, w odróżnieniu od nawigacji, czyli wiedzy samolotu o tym, gdzie on sam jest, i od łączności, czyli rozmowy z pilotem. I jest **rozgłoszeniem** (broadcast): wiadomość nie ma adresata, potwierdzenia ani szyfrowania, a każdy, kto ma odbiornik w zasięgu, słyszy dokładnie to samo, czy to ośrodek kontroli, inny samolot pasażerski, czy szkoła.

„Zależne” to słowo, które niepokoi inżynierów, i to, które najbardziej warto wyjaśnić. Radar wykonuje niezależny pomiar: jeśli przyrządy samolotu się mylą, radarowi to nie przeszkadza. ADS-B dziedziczy każdy błąd własnego systemu nawigacyjnego samolotu, a jeśli ten system zostanie oszukany lub zawiedzie, nadawana pozycja jest błędna, podawana z tą samą pewnością. Dlatego każda wiadomość ADS-B zawiera obok pozycji informację o tym, na ile samolot ufa własnej pozycji (kategorie integralności i dokładności, które poznamy w rozdziale 5), i dlatego radarów nie wyłączono.

„Rozgłoszeniowe” to słowo, dzięki któremu ten kurs w ogóle jest możliwy. Ponieważ wiadomości są wysyłane jawnie do wszystkich, słyszy je nie tylko kontrola ruchu lotniczego, lecz każdy odbiornik nastrojony na 1090 MHz, także ten, który możesz zamontować na dachu szkoły. Ta sama cecha jest źródłem głównego ograniczenia systemu, omówionego w rozdziale 11: wiadomość, którą każdy może przeczytać, to także wiadomość, którą każdy może podrobić.

ROZDZIAŁ 4

Skąd samolot wie, gdzie jest

Cale ADS-B opiera się na tym, że samolot zna własną pozycję, dlatego ten rozdział dotyczy nawigacji satelitarnej. Ogólny termin to **GNSS**, Global Navigation Satellite System (globalny system nawigacji satelitarnej); najbardziej znany jest amerykański GPS, a europejski Galileo, rosyjski GLONASS i chiński BeiDou działają na tej samej zasadzie. Każdy system to konstelacja około 24-30 satelitów krążących na wysokości mniej więcej 20 000 km, daleko ponad samolotami, z których każdy ma na pokładzie zegar atomowy dokładny do kilku miliardowych części sekundy. Każdy satelita nieustannie nadaje sygnał radiowy, który w istocie mówi: „tu satelita numer N, moja pozycja jest taka a taka, a ten sygnał wysłałem dokładnie w chwili T”.

Odbiornik w samolocie słyszy ten sygnał nieco później, bo fala radiowa potrzebuje czasu na podróż: przy 300 000 km/s pokonanie 20 000 km od satelity zajmuje około 67 tysięcznych sekundy. Odbiornik porównuje czas zapisany w wiadomości z czasem jej odbioru. Różnica pomnożona przez prędkość światła to odległość do tego satelity. Jedna odległość umieszcza odbiornik gdzieś na sferze wokół

satelity. Dwie sfery przecinają się w okręgu; trzy w dwóch punktach, z których jeden jest zwykle absurdalny (głęboko pod ziemią albo daleko w kosmosie) i zostaje odrzucony. Trzy satelity by więc wystarczyły, gdyby odbiornik miał idealny zegar.

Nie ma go. Zegar atomowy kosztuje dziesiątki tysięcy euro i by się nie zmieścił; odbiornik ma tani zegar kwarcowy, który może się mylić znacznie bardziej, niż wymaga potrzebna precyzja pomiaru czasu. I tu jest elegancka część. Odbiornik traktuje błąd własnego zegara jako czwartą niewiadomą, obok trzech współrzędnych pozycji, i słucha czwartego satelity. Cztery równania, cztery niewiadome: odbiornik wyznacza swoją pozycję, a przy okazji koryguje własny zegar z dokładnością do kilkudziesięciu nanosekund. Dlatego odbiornik satelitarny potrzebuje co najmniej czterech widocznych satelitów i dlatego każdy odbiornik GNSS jest przy okazji jednym z najdokładniejszych zegarów w budynku.

Warto zatrzymać się przy rzędach wielkości, bo wyjaśniają one, dlaczego nawigacja satelitarna to w gruncie rzeczy ćwiczenie z pomiaru czasu, a geometria jest tylko dodatkiem. Światło pokonuje 30 centymetrów w nanosekundę i 300 metrów w mikrosekundę, więc błąd czasu o jedną milionową sekundy staje się błędem pozycji o 300 metrów, a kilkumetrowa dokładność nowoczesnego odbiornika odpowiada pomiarowi czasu z dokładnością około dziesięciu nanosekund. Weźmy konkretny przypadek. Satelita opatruje sygnał znacznikiem czasu 12:00:00,000 000 000; odbiornik samolotu słyszy go o 12:00:00,070 000 000. Czas podróży wynosi 0,070 s, więc odległość to $0,070 \times 300\,000 \text{ km/s} = 21\,000 \text{ km}$. Gdyby własny zegar odbiornika spieszył się o jedną mikrosekundę, wyliczyłby 21 000,3 km, czyli o 300 metrów za dużo, a ten sam błąd wkradłby się też do odległości od każdego innego satelity. Ten wspólny błąd to dokładnie to, co ujawnia i usuwa czwarty satelita.

Dwie wysokości, nie jedna

Satelity podają wysokość nad matematyczną powierzchnią Ziemi, czyli wysokość *geometryczną*. A jednak wysokość, którą samolot nadaje na potrzeby ruchu lotniczego, to nie ta. To **wysokość barometryczna**, wyznaczana z ciśnienia powietrza na zewnątrz samolotu, mierzonego przez mały otwór w kadłubie zwany otworem ciśnienia statycznego. Ciśnienie powietrza spada z wysokością w znany sposób (przy ziemi mniej więcej o 1 hPa na 8 metrów, wyżej wolniej), a każdy wysokościomierz na świecie przelicza ciśnienie na wysokość według tej samej atmosfery wzorcowej, odniesionej do 1013,25 hPa na poziomie morza. W dniu o nietypowym ciśnieniu wysokość barometryczna każdego samolotu jest błędna o tę samą wartość, i właśnie o to chodzi: dla separacji liczy się nie prawdziwa wysokość nad morzem, lecz to, że dwa samoloty wskazujące „poziom lotu 350” są naprawdę o 300 metrów wyżej niż samolot wskazujący „poziom lotu 340”. ADS-B nadaje w wiadomościach o pozycji wysokość barometryczną, w krokach co 25 stóp (7,6 m), a osobno różnicę między nią a wysokością satelitarną, dzięki czemu odbiornik może odtworzyć obie.

ROZDZIAŁ 5

Budowa wiadomości

Wiadomość ADS-B używana przez samoloty pasażerskie na całym świecie to transmisja Mode S zwana **extended squitter** (rozszerzony squitter); „squitter” to dawny żargon radarowy oznaczający transmisję wysyłaną spontanicznie, a nie w odpowiedzi, a „extended”, bo przy 112 bitach jest dwa razy dłuższa niż pierwotna odpowiedź Mode S. Inżynierowie piszą „1090ES” od „1090 MHz extended squitter”. Każda

transmisja trwa łącznie 120 mikrosekund: 8-mikrosekundowa *preambuła*, czyli stały wzór czterech impulsów, który pozwala odbiornikowi rozpoznać początek wiadomości i zsynchronizować zegar, a po niej 112 bitów danych, po jednym bicie na mikrosekundę.

Jak wysyła się bit: modulacja położenia impulsu

Każde jednomikrosekundowe okno bitu jest podzielone na dwie połowy. Impuls energii radiowej w pierwszej połowie i cisza w drugiej oznaczają 1; cisza, a potem impuls oznaczają 0. Na każdy bit przypada więc dokładnie jeden impuls, niezależnie od danych, a odbiornik musi tylko rozstrzygnąć, która połowa każdego okna była głośniejsza. Ten sposób, modulacja położenia impulsu (PPM), jest odporny na rodzaje szumów i zaników, jakim podlega sygnał w drodze od transpondera do odległej anteny, a jego dekodowanie jest tanie.

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



Każde okno trwa 1 mikrosekundę. Impuls w pierwszej połowie: 1. Impuls w drugiej połowie: 0.

112 bitów

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

Pierwsze pięć bitów, format downlink (format łącza w dół), mówi, jakiego rodzaju jest to wiadomość Mode S; wartość 17 oznacza „ADS-B z transpondera Mode S”. 24-bitowy **adres ICAO** to stała tożsamość samolotu, przydzielana przy jego rejestracji: możliwych adresów jest 2 do potęgi 24, czyli 16 777 216, a ICAO, agenda ONZ ds. lotnictwa cywilnego, przydziela je państwom w blokach. Belgijskie samoloty mają na przykład adresy od 448000 do 44FFFF w zapisie szesnastkowym. W przeciwieństwie do czterocyfrowego kodu dawnego Mode A ten adres nigdy się nie zmienia i nigdy nie jest współdzielony, więc odbiornik już od pierwszej wiadomości wie na pewno, który samolot słyszy.

56-bitowe pole **ME** to właściwa treść, a jego pierwsze pięć bitów, *kod typu*, mówi, co oznacza reszta. Kody typu 1-4 przenoszą znak wywoławczy samolotu, np. BEL1234 lub RYR7KL, jako osiem sześciobitowych znaków. Kody 9-18 przenoszą pozycję w locie z wysokością barometryczną; 20-22 to samo z wysokością satelitarną. Kod 19 przenosi prędkość: prędkość względem ziemi rozłożoną na składowe wschód-zachód i północ-południe, prędkość pionową oraz różnicę między wysokością barometryczną a satelitarną. Kody 28, 29 i 31 przenoszą status: kody awaryjne, wybraną wysokość oraz kategorie integralności i dokładności, które mówią, na ile można ufać nadawanej pozycji (np. „NIC” równe 8 obiecuje, że z dużym prawdopodobieństwem prawdziwa pozycja leży w promieniu 185 m od zgłoszonej).

Ostatnie 24 bity to **cykliczny kod nadmiarowy** (CRC), liczba wyliczona z poprzednich 88 bitów przez dzielenie przez ustalony wielomian. Odbiornik powtarza to obliczenie na zdekodowanych bitach; jeśli wynik się nie zgadza, co najmniej jeden bit uległ uszkodzeniu po drodze i wiadomość jest odrzucana. Ponieważ jednomikrosekundowy impuls łatwo zgubić przez szum albo przez nakładającą się wiadomość innego samolotu, to właśnie ta kontrola chroni ekran kontrolera przed zniekształconymi pozycjami. Prawdziwa wiadomość, tak jak zapisałby ją odbiornik, wygląda tak:

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: format downlink 17, możliwości 5. 4840D6: adres ICAO, samolot holenderski. 20...: kod typu 4, wiadomość identyfikacyjna, która dekoduje się do znaku wywoławczego KLM1023. 576098: kontrola błędów.

Jak zmieścić Ziemię w 34 bitach

Wiadomość o pozycji ma tylko 17 bitów na szerokość i 17 na długość geograficzną. To 131 072 kroki dookoła całego globu, każdy po około 300 m na równiku: o wiele za mało. ADS-B rozwiązuje to **kompaktowym raportowaniem pozycji** (CPR). Ziemia jest podzielona na strefy; 17 bitów daje bardzo dokładną pozycję (do około 5 m) wewnątrz strefy, ale nie mówi, o którą strefę chodzi. Samolot przełącza się na przemian między dwiema nieco różnymi siatkami stref, wiadomościami „parzystymi” i „nieparzystymi”, a odbiornik, który usłyszał po jednej z każdego rodzaju, może jednoznacznie ustalić strefę. Gdy już to robi, do śledzenia samolotu wystarczy pojedyncza wiadomość, bo trudno, by w pół sekundy przeskoczył do innej strefy. To zgrabna sztuczka, która podwaja użyteczną precyzję bez żadnego kosztu w bitach.

Jak często

Transponder w locie wysyła wiadomość o pozycji dwa razy na sekundę, wiadomość o prędkości dwa razy na sekundę, a znak wywoławczy co pięć sekund, do tego wiadomości o statusie w dłuższych odstępach, czyli łącznie około czterech-pięciu extended squitterów na sekundę. Każdy trwa 120 mikrosekund; transponder faktycznie nadaje ADS-B przez znacznie mniej niż tysięczną część czasu. Przez resztę sekundy nasłuchuje zapytań radarowych na 1030 MHz i zapytań systemów antykolizyjnych innych samolotów oraz na nie odpowiada.

ROZDZIAŁ 6 - FIZYKA

Fala: radio jako niewidzialne światło

Wiadomość opuszcza samolot jako **fala radiowa**, a najbardziej użyteczna myśl w całym kursie brzmi: fala radiowa i promień światła to jedno i to samo. Jedno i drugie to fale elektromagnetyczne: układ pól elektrycznego i magnetycznego, które drgają razem i biegną przez przestrzeń z prędkością światła c , wynoszącą 299 792 458 metrów na sekundę, czyli w przybliżeniu 300 000 km/s. Falę radiową od zielonego światła, od promieni rentgenowskich w szpitalu czy od mikrofal w kuchence odróżnia tylko to, jak szybko drgają pola: **częstotliwość** f , mierzona w hercach (drganiach na sekundę).

Ponieważ fala biegnie ze stałą prędkością, częstotliwość wyznacza odległość między jednym grzbietem a następnym, czyli **długość fali**, λ . W ciągu sekundy fala pokonuje c metrów i wykonuje f drgań, więc każde drganie zajmuje c / f metrów:

$$c = f \times \lambda$$

Dla ADS-B: $\lambda = 300\,000\,000 / 1\,090\,000\,000 = 0,275$ m. Fala między samolotem a twoją anteną ma grzbiety odległe o 27,5 cm, mniej więcej na długość szkolnej linijki.

Fala	Częstotliwość	Długość fali	Uwagi
Radio FM	100 MHz	3 m	Anteny samochodowe to ułamek tej długości
ADS-B / Mode S	1090 MHz	27,5 cm	Także odpowiedzi transponderów na zapytania radaru
Telefon komórkowy (pasmo 4G)	1800 MHz	17 cm	Bliski sąsiad w widmie
Wi-Fi, kuchenka mikrofalowa	2450 MHz	12 cm	Ta sama częstotliwość, zupełnie inna moc
Widzialne światło zielone	560 000 000 MHz	0,000 54 mm	Częstotliwość pół miliona razy wyższa

Dla wszystkiego, co dalej, ważne są dwie konsekwencje. Po pierwsze, skoro fala jest światłem, biegnie po liniach prostych, o ile coś jej nie ugnie lub nie zablokuje, i nie przechodzi przez Ziemię. To wyznacza zasięg systemu, temat rozdziału 7. Po drugie, skoro jej długość wynosi 27,5 cm, metalowe konstrukcje, które najsilniej z nią oddziałują, czyli anteny, mają rozmiar tego rzędu; to temat rozdziału 8.

Dlaczego radio to nie dźwięk

Najczęstsze nieporozumienie, u dorosłych równie często jak u dzieci, to mylenie radia z dźwiękiem, zapewne dlatego, że „radio” to pudełko, które wydaje dźwięki. To zjawiska niemające ze sobą nic wspólnego. Dźwięk to fala ciśnienia w powietrzu, łańcuch cząsteczek popychających sąsiadów; potrzebuje ośrodka, w którym się rozchodzi, porusza się z prędkością 340 m/s i nie przejdzie przez próżnię. Radio niczego nie potrzebuje: przechodzi przez próżnię między satelitą a samolotem i porusza się prawie milion razy szybciej. Hałas silników samolotu i jego wiadomość ADS-B opuszczają go w tej samej chwili; wiadomość dociera do odbiornika oddalonego o 20 km po 67 mikrosekundach, dźwięk dopiero po pełnej minucie.

Dlaczego 1090 MHz

Ta częstotliwość to spadek po przeszłości. Umowy międzynarodowe z lat 50. zarezerwowały pasmo od 960 do 1215 MHz dla radionawigacji lotniczej, a 1090 MHz stało się częstotliwością odpowiedzi transponderów radaru wtórnego. Gdy projektowano ADS-B, wykorzystanie transpondera, w który już był wyposażony każdy samolot pasażerski, okazało się znacznie tańsze niż montaż nowego radia, więc ADS-B stało się po prostu kolejną rzeczą, którą transponder Mode S mówi na 1090 MHz. W Stanach Zjednoczonych mniejsze samoloty latające poniżej około 5500 m mogą zamiast tego używać drugiego systemu, UAT na 978 MHz, dlatego tamtejsze odbiorniki często słuchają obu częstotliwości.

ROZDZIAŁ 7 - FIZYKA

Zasięg: krzywizna Ziemi i słabnięcie sygnału

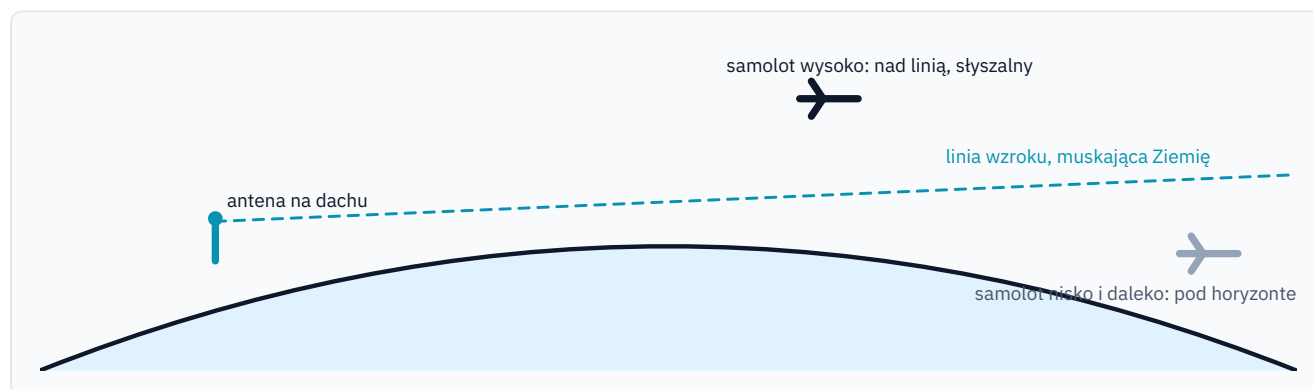
Transponder nadaje z mocą szczytową kilkuset watów. Z jak daleka można usłyszeć taki sygnał? Ograniczają go dwie zupełnie różne rzeczy i warto je rozdzielić: geometria, która wyznacza twardą granicę, i moc, która wyznacza miękką.

Horyzont radiowy

Na 1090 MHz radio zachowuje się jak światło: biegnie po liniach prostych i nie zagina się wokół Ziemi. Antena naziemna może więc usłyszeć samolot tylko wtedy, gdy łączy je prosta linia, która nie przechodzi przez grunt. Dla obserwatora na powierzchni horyzont jest tam, gdzie ta linia ledwie muska Ziemię. Im wyżej leci samolot, tym dalej leży ten punkt styczności; im wyżej jest antena, tym jeszcze dalej. Geometria stycznej do kuli daje prosty wynik: odległość do horyzontu w kilometrach to około 3,57 razy pierwiastek kwadratowy z wysokości w metrach. Atmosfera lekko ugina fale radiowe w dół, co wydłuża horyzont o mniej więcej 15 procent, dlatego inżynierowie używają współczynnika 4,12:

$$d \text{ (km)} = 4,12 \times (\sqrt{h \text{ samolotu}} + \sqrt{h \text{ anteny}}) \quad \text{wysokości w metrach}$$

Samolot na 11 000 m, antena na dachu o wysokości 20 m: $4,12 \times (104,9 + 4,5) = 451$ km. Samolot na 1000 m, ten sam dach: $4,12 \times (31,6 + 4,5) = 149$ km. Samolot na ziemi 15 km dalej: w ogóle niesłyszalny, chyba że teren pomiędzy jest płaski i wolny od przeszkód.



To wyjaśnia charakterystyczny kształt zasięgu odbiornika: krąg o promieniu 400 km lub większym dla ruchu na dużych wysokościach, kurczący się do kilkudziesięciu kilometrów dla samolotów podchodzących do lądowania i prawie zerowy dla samolotów na ziemi, poza lotniskiem tuż obok. Wyjaśnia też, dlaczego wysokość odbiornika liczy się znacznie bardziej niż jego jakość i dlaczego wzgórze, wysoki budynek, a nawet skrzydło samego samolotu, gdy przechyla się w przeciwną stronę, mogą natychmiast odciąć sygnał.

Prawo odwrotnych kwadratów

W obrębie horyzontu sygnał słabnie z odległością. Antena transpondera promieniuje we wszystkich kierunkach poziomych, więc jej moc rozkłada się na coraz większej sferze. Pole powierzchni sfery rośnie z kwadratem promienia, więc moc padająca na antenę o stałym rozmiarze maleje z kwadratem odległości: dwa razy dalej to ćwierć mocy; dziesięć razy dalej to setna część. Inżynierowie wyrażają to jako *tłumienie*

trasy w decybelach, a dla 1090 MHz na odległości 400 km wynosi ono około 145 dB, co oznacza, że moc odebrana jest około 10 do potęgi 14,5 razy mniejsza od nadanej. Impuls o mocy 250 watów dociera jako mniej więcej jedna dziesiąta miliardowej części miliwata. Dobry odbiornik jest w stanie to wykryć, ledwo ledwo, i dlatego horyzont geometryczny i granica mocy zbiegają się na odległości kilkuset kilometrów: system został tak zaprojektowany.

Obie granice oddziałują na siebie w sposób, który warto zrozumieć. W obrębie horyzontu silny sygnał od pobliskiego samolotu i słaby od odległego dekodują się równie dobrze, bo schemat położenia impulsu z rozdziału 5 pyta tylko, która połowa każdego okna bitu była głośniejsza, a nie jak głośna. Sygnał nie traci użyteczności stopniowo w miarę oddalania się samolotu; pozostaje dekodowalny, dopóki gdzieś w pobliżu horyzontu albo nie odetnie go geometria, albo szum w odbiorniku w końcu go nie zagłuszy, a wtedy ślad się urywa. Dlatego mapy zasięgu mają ostre krawędzie i dlatego najdalsze samoloty, które słyszy odbiornik, to niemal zawsze te lecące najwyżej.

ROZDZIAŁ 8 - FIZYKA

Anteny: jak złapać falę o długości 27 centymetrów

Antena to kawałek przewodnika ukształtowany tak, by przechodząca fala elektromagnetyczna wprawiała zawarte w nim elektrony w ruch w jej rytmie, wytwarzając malutki prąd zmienny, który odbiornik może wzmocnić. W nadajniku dzieje się odwrotnie: prąd zmienny w antenie samolotu wysyła falę w świat. Sprawność tej wymiany zależy od rozmiaru przewodnika w stosunku do długości fali. Prosty przewód reaguje najsilniej, czyli *rezonuje*, gdy ma długość połowy fali, bo wtedy prąd przelewający się tam i z powrotem wzdłuż niego dokładnie pasuje do drgań fali, jak huśtawka popychana w jej naturalnym rytmie. Dla 1090 MHz połowa fali to 13,75 cm.

Najczęstszą praktyczną formą jest **monopol ćwierćfalowy**: pionowy pręt o długości ćwierci fali, 6,9 cm, stojący na powierzchni przewodzącej, czyli *przeciwwadze* (ground plane). Przeciwwaga działa jak lustro, więc pręt razem ze swoim odbiciem zachowuje się jak antena półfalowa. Dlatego antena ADS-B na samolocie to krępy, kilkucentymetrowy płetwowaty element na kadłubie, który pełni rolę przeciwwagi, i dlatego antena hobbysty to krótki drut na blaszanej pokrywie. Drut o niewłaściwej długości też działa, ale znacznie gorzej: „metalowe ucho” jest dostrojone.

Z fizyki wynikają trzy kolejne cechy anteny i każda ma widoczne skutki. Pierwsza to **polaryzacja**. Pole elektryczne fali elektromagnetycznej drga w określonym kierunku, prostopadłym do kierunku jej biegu, a antena reaguje tylko na składową pola wzdłuż własnej długości. Anteny samolotów są montowane pionowo, więc fala ADS-B dociera spolaryzowana pionowo, a antena odbiorcza też musi stać pionowo; położona na boku nie słyszy prawie nic, tak jak fala na sznurze machanym w górę i w dół zostaje zatrzymana przez poziomą szczelinę. Druga to **charakterystyka promieniowania**. Pionowa antena jest najbardziej czuła w kierunku horyzontu, a wcale wzdłuż własnej osi, więc jej czułość w trzech wymiarach ma kształt obwarzanka z anteną przechodzącą przez dziurkę. Odbiorniki bez trudu słyszą więc samoloty oddalone o 300 km, a gubią na kilka sekund ten, który przelatuje dokładnie nad nimi; warto to wypatrywać na każdej mapie na żywo. Ustawienie kilku elementów rezonansowych jeden nad drugim spłaszczają obwarzanek, skupiając czułość w kierunku horyzontu, gdzie są odległe samoloty, kosztem kierunku pionowego; to właśnie oznacza **zysk** anteny i zawsze jest to przeniesienie czułości, nigdy jej stworzenie.

Trzecia dotyczy tego, co znajduje się między anteną a odbiornikiem. Antena zbiera nie tylko 1090 MHz, lecz każdy sygnał w okolicy, w tym transmisje telefonii komórkowej odległe o kilkaset megaherców i nieporównanie silniejsze, dlatego na początku toru umieszcza się filtr przepuszczający tylko pasmo lotnicze. Potem sygnał musi przejść przez kabel, a na 1090 MHz kabel koncentryczny traci mniej więcej połowę sygnału co dziesięć metrów; lekarstwem jest wzmacniacz niskoszumowy przy antenie, przed kablem, aby sygnał był wystarczająco silny, by przetrwać podróż, a nie przy odbiorniku, gdzie wzmacnianie wzmocniłoby szum kabla razem z tym, co zostało z sygnału. To szczegóły, ale to właśnie one decydują, czy odbiornik na dachu szkoły słyszy samoloty na horyzoncie, czy tylko te w pobliżu.

ROZDZIAŁ 9

Odbiór i dekodowanie

Między anteną a punktem na mapie jest łańcuch pięciu etapów. Antena zamienia przechodzącą falę w prąd zmienny o napięciu kilku mikrowoltów. Filtr i wzmacniacz niskoszumowy zachowują pasmo 1090 MHz, odrzucają wszystko inne i wzmacniają sygnał tysiąckrotnie. Radio programowalne (SDR) dostraja się do częstotliwości i próbkuje sygnał dwa miliony razy na sekundę, zamieniając go w strumień liczb. Dekoder szuka w tym strumieniu wzoru preambuły, odczytuje 112 bitów, sprawdza parzystość i dekoduje pola. A moduł śledzący zbiera wiadomości od każdego samolotu w jeden, stale aktualizowany zapis: pozycję, ślad, etykietę.

Niezwykły jest etap trzeci. Mniej więcej do 2010 roku dekodowanie 1090 MHz wymagało specjalistycznego sprzętu za tysiące euro. Potem hobbyści odkryli, że tuner telewizyjny na USB za 20 euro zawiera układ, któremu można kazać dostroić się do dowolnej częstotliwości i przekazać surowy sygnał do komputera. To **radio programowalne** (software-defined radio) zamienia problem radiowy w problem programistyczny: laptop lub Raspberry Pi otrzymuje strumień dwóch milionów liczb na sekundę opisujących siłę sygnału, a darmowe oprogramowanie szuka wzoru preambuły, mierzy, która połowa każdego mikrosekundowego okna jest głośniejsza, składa 112 bitów, wylicza CRC i wypisuje pola. Projekt odbiornika w zestawie dla szkoły średniej to właśnie ten łańcuch, a szkoła może go zbudować za mniej niż 100 euro.

Na etapie śledzenia strumień wiadomości staje się wiedzą. Pojedyncza wiadomość o pozycji, przypomnijmy, jest niejednoznaczna, dopóki nie sparuje się wiadomości parzystej z nieparzystą. Prędkość przychodzi osobno od pozycji, znak wywoławczy znowu osobno, a moduł śledzący zszywa je według adresu ICAO, odrzuca wszystko, co nie przeszło kontroli błędów, i przechowuje ostatni znany stan każdego samolotu. Jeśli przez minutę nie przyjdzie żadna wiadomość, zwykle dlatego, że samolot zniknął za horyzontem, ślad wygasa.

ROZDZIAŁ 10

Od jednego odbiornika do mapy kontynentu

Jeden odbiornik słyszy krąg nieba o średnicy kilkuset kilometrów. Mapa Europy potrzebuje ich setek, a najbardziej przydatne nie stoją w miastach, lecz są rozproszone: na wybrzeżach, w dolinach, na wyspach, wszędzie tam, dokąd nie sięga krąg innego odbiornika. Każdy odbiornik wysyła zdekodowane wiadomości, każdą opatrzoną czasem odbioru, przez internet do centralnej usługi. Ta usługa je *agreguje*: ta sama wiadomość od wysoko lecącego samolotu zwykle przychodzi jednocześnie od dziesięciu lub

dwudziestu odbiorników, a duplikaty trzeba rozpoznać i scalić. Usługa też sprawdza: pozycja, która nie zgadza się z tym, co o tym samym samolocie widzą wszystkie sąsiednie odbiorniki, to prawdopodobnie błąd dekodowania lub wadliwy transponder i zostaje oznaczona albo odrzucona.

Multilateracja: jak znaleźć samoloty, które nie mówią, gdzie są

Nie każdy samolot nadaje swoją pozycję. Starsze transpondery odpowiadają radarowi tożsamością i wysokością, ale nie mają danych z satelitów; niektóre samoloty celowo nie wysyłają żadnej pozycji. Mimo to ich transmisje na 1090 MHz wciąż docierają do ziemi, a sieć może je zlokalizować, odwracając zasadę nawigacji satelitarnej. Jeśli cztery odbiorniki z precyzyjnie zsynchronizowanymi zegarami zapiszą chwilę dotarcia tej samej transmisji, różnice między tymi chwilami ujawniają różnice odległości: wiadomość, która dotarła do odbiornika A o jedną mikrosekundę wcześniej niż do odbiornika B, została wysłana z punktu o 300 m bliższego A niż B. Wszystkie punkty o tej własności leżą na zakrzywionej powierzchni, hiperboloidzie, między A i B. Trzy takie powierzchnie, z czterech odbiorników, przecinają się w miejscu samolotu. To jest **multilateracja** i wymaga ona synchronizacji czasu z dokładnością około jednej dziesiątej mikrosekundy, czyli 30 m, między odbiornikami oddalonymi o setki kilometrów, którą odbiorniki uzyskują z tych samych satelitów, z których korzysta samolot.

Ta sama idea, dwa razy

Nawigacja satelitarna: jeden odbiornik, cztery nadajniki o znanych pozycjach, szukamy położenia odbiornika. Multilateracja: jeden nadajnik, cztery odbiorniki o znanych pozycjach, szukamy położenia nadajnika. W obu przypadkach tak naprawdę mierzy się czas, a 1 mikrosekunda to 300 metrów.

ROZDZIAŁ 11

Do czego służy i gdzie zawodzi

Pierwszym odbiorcą jest kontrola ruchu lotniczego. W całej Europie kontrolerzy widzą dziś połączony obraz, w którym ADS-B, z aktualizacjami dwa razy na sekundę i dokładnością na poziomie satelitarnym, łączy się z radarem i multilateracją; tam, gdzie radar nigdy nie sięgał, nad Północnym Atlantykiem, Arktyką, Saharą i większością oceanów, wiadomości ADS-B odbierają odbiorniki umieszczone na satelitach komunikacyjnych na niskiej orbicie, co pozwoliło znacznie zmniejszyć odstęp między samolotami przecinającymi Atlantyk. Drugim odbiorcą są same samoloty: samolot pasażerski z „ADS-B In” pokazuje załódze pobliski ruch i przekazuje go do systemu unikania kolizji. Lotniska używają go do śledzenia samolotów i pojazdów na ziemi we mgle. Naukowcy wykorzystują otwarte dane do badania hałasu, zużycia paliwa, smug kondensacyjnych i opóźnień. A odbiornik na dachu szkoły w niewielkim stopniu uczestniczy w tym wszystkim.

Słabości systemu wynikają wprost z jego konstrukcji i każdą z nich warto zrozumieć, a nie tylko wymienić. Ponieważ wiadomości są nadawane jawnie, ani szyfrowane, ani podpisywane, w samej wiadomości nie ma niczego, co dowodziłoby, że pochodzi od samolotu. Nadajnik na ziemi mógłby, nielegalnie, nadać idealnie sformatowaną wiadomość opisującą samolot, który nie istnieje, a odbiornik zdekodowałby ją bez zastrzeżeń. System chroni nie sama wiadomość, lecz jej kontekst: fantom nie pojawi się na radarze, nie zostanie znaleziony przez multilaterację i nie będzie się zachowywał jak prawdziwy ruch, a ośrodki

kontroli nieustannie porównują te źródła. Wersja protokołu z podpisami kryptograficznymi jest dyskutowana od wielu lat; przeszkoda jest nie tyle techniczna, co praktyczna, bo trzeba by wymienić każdy transponder na świecie.

Ponieważ pozycja zależy od odbiornika satelitarne samolotu, wszystko, co zakłóca nawigację satelitarną, zakłóca też ADS-B. Zagłuszanie i podszywanie się pod sygnały satelitarne (jamming i spoofing) stały się powszechne w pobliżu stref konfliktów, a samolot przelatujący przez taki obszar może nie być w stanie wyznaczyć pozycji albo wyznaczyć błędną. Jego wiadomości mają wtedy obniżoną kategorię integralności, system kontrolera je oznacza, a pateczkę przejmuje radar, czyli niezależny pomiar, którego ADS-B nigdy nie miało całkowicie zastąpić. Relacja między nimi to więc nie relacja następcy i poprzednika, lecz partnerów o uzupełniających się słabościach.

Ponieważ obowiązek obejmuje samoloty pasażerskie i większość większych samolotów, ale nie wszystko, co lata, mapa jest z założenia niepełna. Lekkie samoloty poza kontrolowaną przestrzenią powietrzną, szybowce, balony i wiele samolotów wojskowych mogą w ogóle nie mieć ADS-B, a niektóre lekkie samoloty używają innych systemów, których odbiornik 1090 MHz nie słyszy. A ponieważ rozgłoszenie identyfikuje samolot, może też zidentyfikować jego właściciela: śledzenie konkretnego prywatnego odrzutowca to w praktyce śledzenie konkretnej osoby, co doprowadziło do programów ukrywających znaki rejestracyjne samolotów na prośbę właścicieli i do trwającego sporu o to, czy informacja, którą samolot nadaje całemu światu, może być zarazem prywatna. To dobry temat do dyskusji ze starszymi uczniami, bo fizyka nie daje na to pytanie odpowiedzi.

ROZDZIAŁ 12

Krótką historia

1935-1945

Radar pierwotny powstaje w Wielkiej Brytanii, Niemczech i Stanach Zjednoczonych; pod koniec wojny transpondery „swój-obcy” (IFF) odpowiadają na impulsy radarowe zakodowaną odpowiedzią, co jest przodkiem radaru wtórnego.

Lata 50.-60.

Standaryzacja cywilnego radaru wtórnego: zapytania na 1030 MHz, odpowiedzi na 1090 MHz, kody identyfikacyjne Mode A i wysokość w Mode C.

Lata 80.

Mode S, z unikalnymi 24-bitowymi adresami i wiadomościami z danymi, opracowany w MIT Lincoln Laboratory i przyjęty przez ICAO. GPS zaczyna działać dla użytkowników cywilnych.

Lata 90.-2000.

Zdefiniowanie i testy ADS-B, zwłaszcza na Alasce, gdzie pokrycie radarowe było niemożliwe, a wypadki częste. Extended squitter na 1090 MHz zostaje znormalizowany na poziomie międzynarodowym.

Lata 2010.

Tanie radia programowalne zamieniają odbiór w hobby; pojawiają się wolontariackie sieci liczące tysiące odbiorników. Odbiorniki trafiają na satelity, by objąć zasięgiem oceany.

2020

ADS-B staje się obowiązkowe dla większości samolotów w kontrolowanej przestrzeni powietrznej w Stanach Zjednoczonych (styczeń) i w Unii Europejskiej (czerwiec, z okresem przejściowym do końca roku). Niebo zaczyna mówić, wszędzie i bez przerwy.

Słowniczek

ADS-B

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (automatyczny zależny dozór rozgłoszeniowy). Samoloty rozgłaszające własną pozycję.

Wysokość barometryczna

Wysokość wyznaczona z ciśnienia powietrza według atmosfery wzorcowej; to ją zgłaszają samoloty.

CPR

Kompaktowe raportowanie pozycji, schemat parzysty/nieparzysty, który mieści dokładną pozycję w 34 bitach.

CRC

Cykliczny kod nadmiarowy, 24-bitowa kontrola błędów kończąca każdą wiadomość.

Rozszerzony squitter (extended squitter)

112-bitowa spontaniczna transmisja Mode S, która przenosi ADS-B.

GNSS

Globalny system nawigacji satelitarnej: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou.

Adres ICAO

Stała 24-bitowa tożsamość transpondera samolotu.

Mode S

Standard selektywnego radaru wtórnego, na którym zbudowano ADS-B.

Multilateracja

Lokalizowanie nadajnika na podstawie różnic czasu dotarcia sygnału do kilku odbiorników.

Tłumienie trasy

Stabnięcie sygnału wraz z odległością, zgodnie z prawem odwrotnych kwadratów.

Horyzont radiowy

Największa odległość, na której prosta linia między anteną a samolotem nie zahacza o Ziemię.

SDR

Radio programowalne: tuner przekazujący surowe próbki sygnału do komputera w celu dekodowania.

SSR

Radar wtórny: stacja naziemna pyta, transponder odpowiada.

Transponder

Radio samolotu, które odpowiada radarowi i nadaje ADS-B na 1090 MHz.

Długość fali

Odległość między kolejnymi grzbietami fali: c / f , 27,5 cm przy 1090 MHz.

DALEJ

Od teorii do praktyki: zbuduj odbiornik

Dwanaście rozdziałów wyjaśniło system, który możesz teraz wziąć do ręki. Warsztat praktyczny zamienia je w jedno popołudnie pracy: co kupić za 100-150 euro, jak zamontować antenę i gdzie ją umieścić, jak przygotować Raspberry Pi i zainstalować feeder Dataero oraz jak patrzeć, jak samoloty, które słyszysz, pojawiają się na mapie na żywo, przypisane do twojej stacji. Na każdy z powyższych rozdziałów czeka tam pomiar: horyzont radiowy sprawdzony na prawdziwych samolotach, prawo odwrotnych kwadratów w kolumnie sygnału, dobowy rytm nieba.

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