KURSUS REFERENSI - UNTUK SEMUA ORANG DEWASA

Apa itu ADS-B dan cara kerjanya

Dua belas bab. Tidak diperlukan pengetahuan awal tentang penerbangan atau radio; matematika sekolah menengah sudah cukup untuk contoh-contoh soal, dan contoh itu boleh dilewati tanpa kehilangan benang merah. Waktu baca sekitar 50 menit.

Belajar - https://radar.dataero.eu/id/learning/course 2026-11-21

DAFTAR ISI

BAB 1 Masalahnya: langit penuh pesawat yang tidak bisa dilihat siapa pun
BAB 2 Sebelum ADS-B: menemukan pesawat dengan radar
BAB 3 Gagasannya: biarkan pesawat yang memberi tahu kita
BAB 4 Bagaimana pesawat mengetahui posisinya
BAB 5 Anatomi sebuah pesan
BAB 6 - FISIKA Gelombang: radio sebagai cahaya tak terlihat
BAB 7 - FISIKA Jangkauan: lengkungan Bumi dan melemahnya sinyal
BAB 8 - FISIKA Antena: menangkap gelombang 27 sentimeter
BAB 9 Penerimaan dan dekode
BAB 10 Dari satu penerima ke peta satu benua
BAB 11 Untuk apa sistem ini digunakan, dan di mana kekurangannya
BAB 12 Sejarah singkat
Glosarium
SELANJUTNYA Dari teori ke praktik: rakit penerimanya

BAB 1

Masalahnya: langit penuh pesawat yang tidak bisa dilihat siapa pun

Pada hari kerja biasa, sekitar 30.000 penerbangan melintasi wilayah udara Eropa. Pesawat penumpang di ketinggian jelajah bergerak sekitar 250 meter per detik, atau 900 km/jam; dua pesawat yang saling mendekat memperpendek jarak setengah kilometer setiap detik. Pilot yang melihat ke luar jendela hampir tidak melihat apa pun dari semua ini: pada ketinggian 10.000 meter, pesawat lain hanyalah titik kecil, dan awan toh menyembunyikan sebagian besarnya. Langit adalah jaringan jalan tiga dimensi tanpa marka jalan, dan lalu lintas di atasnya cepat sekaligus tak terlihat.

Pemanduan lalu lintas udara ada untuk menjaga agar lalu lintas itu tetap berjarak. Aturannya pada prinsipnya sederhana: di wilayah udara terkendali, pesawat dipisahkan setidaknya 1.000 kaki (sekitar 300 meter) secara vertikal, atau dengan jarak horizontal tertentu, biasanya 5 mil laut (9,3 km) di area dengan cakupan radar dan jauh lebih besar di atas samudra. Untuk menerapkan aturan itu, pemandu lalu lintas udara perlu mengetahui, terus-menerus dan secara andal, posisi setiap pesawat di sektornya: bukan di mana pesawat itu semenit yang lalu, melainkan di mana posisinya sekarang, seberapa tinggi, dan ke arah mana ia bergerak. Seluruh pokok bahasan kursus ini adalah bagaimana pengetahuan itu diperoleh. Istilah teknisnya adalah **pengawasan** (surveillance).

Angka yang perlu diingat
Pada 900 km/jam, pesawat menempuh 15 km dalam satu menit dan 250 m dalam satu detik. Metode pengawasan apa pun yang lambat diperbarui, atau memiliki kesalahan besar, membuat pemandu harus menebak-nebak justru pada jarak-jarak yang penting.

BAB 2

Sebelum ADS-B: menemukan pesawat dengan radar

Jawaban pertama, yang dikembangkan pada akhir 1930-an dan matang selama Perang Dunia Kedua, adalah **radar primer**. Antena besar yang berputar memancarkan pulsa energi radio yang singkat dan sangat kuat. Ketika pulsa itu mengenai pesawat, sebagian sangat kecil darinya dipantulkan kembali. Radar mengukur waktu antara pulsa dipancarkan dan gemanya kembali; karena radio merambat dengan kecepatan cahaya, 300.000 km/s, waktu itu memberikan jarak. Arah antena saat itu memberikan arah sudut (bearing). Radar primer sangat mandiri: pesawat sama sekali tidak memerlukan peralatan, itulah sebabnya radar ini masih dipakai oleh militer. Namun radar primer punya kelemahan nyata. Gema dari pesawat yang jauh luar biasa lemah, sehingga pemancarnya harus sangat besar. Gema itu tidak mengatakan apa pun tentang identitas pesawat atau ketinggiannya. Dan antena memerlukan beberapa detik untuk menyelesaikan satu putaran, sehingga setiap pesawat hanya terlihat sekali setiap 4 sampai 12 detik, dan selama itu pesawat sudah bergerak hingga 3 km.

Jawaban kedua, **radar pengawasan sekunder** (SSR), menjadikan pesawat sebagai peserta. Stasiun darat memancarkan sebuah pertanyaan, *interogasi*, pada 1030 MHz. Radio kecil di dalam pesawat, **transponder**, mendengar pertanyaan itu dan menjawab pada 1090 MHz dengan sinyal kuatnya sendiri. Karena jawaban itu dipancarkan, bukan dipantulkan, kekuatannya jutaan kali lebih besar daripada gema radar, dan karena dibuat oleh komputer, jawaban itu dapat membawa informasi. Dalam bentuk tertua (Mode A), jawaban berisi kode identitas empat digit yang diberikan oleh pemandu; dalam Mode C, jawaban juga berisi ketinggian pesawat. Pada 1980-an muncul **Mode S** ("S" untuk selektif), di mana setiap transponder memiliki alamat 24 bit yang unik, dapat diinterogasi satu per satu, dan dapat menjawab dengan pesan data 56 atau 112 bit. Ingatlah angka itu, 1090 MHz, dan kata itu, Mode S: ADS-B dibangun langsung di atas keduanya.

Radar sekunder merupakan kemajuan besar, tetapi masih memiliki dua keterbatasan yang sama dengan pendahulunya. Pesawat hanya berbicara ketika ditanya, sehingga di darat tetap diperlukan stasiun interogasi dalam jangkauan, dan itu tidak mungkin di atas samudra, gurun, dan pegunungan. Stasiun itu juga tetap memerlukan antena berputar untuk mengetahui dari arah mana jawaban datang, sehingga setiap pesawat tetap hanya terlihat sekali per putaran, dan layar pemandu tetap menampilkan titik yang melompat setiap beberapa detik, bukan pesawat yang bergerak mulus. Untuk memperbaikinya, diperlukan sesuatu yang benar-benar berbeda: cara bagi pesawat untuk melaporkan posisinya tanpa ditanya, dan tanpa darat harus mengukur apa pun.

BAB 3

Gagasannya: biarkan pesawat yang memberi tahu kita

Pada 1990-an, dua teknologi telah matang sehingga pendekatan lain menjadi mungkin. Navigasi satelit memberi setiap pesawat yang dilengkapi peralatan memadai pengetahuan akurat tentang posisinya sendiri, jauh lebih baik daripada yang dapat diukur radar mana pun dari darat. Dan transponder Mode S sudah menyediakan radio yang dapat mengirim pesan data pada 1090 MHz. Gabungkan keduanya dan logikanya tak terbantahkan: alih-alih darat bersusah payah mengukur di mana pesawat berada, biarkan pesawat, yang sudah tahu, sekadar menyampaikannya, secara berkala, kepada semua orang. Itulah ADS-B, dan keempat kata dalam namanya merupakan deskripsi yang tepat.

Sistem ini **otomatis** (automatic): tidak ada yang memicu pemancaran. Transponder memancar menurut jadwalnya sendiri, sekitar dua kali sedetik, entah ada stasiun darat dalam jangkauan atau tidak, dan entah pilot melakukan sesuatu atau tidak; bahkan pilot tidak dapat menghentikannya selama penerbangan kecuali dengan mematikan transponder, dan itu dilarang. Sistem ini **dependen** (dependent): setiap isi pesan berasal dari peralatan pesawat sendiri, posisi dari penerima satelitnya dan ketinggian dari altimeter tekanannya, dan darat tidak mengukur apa pun; darat memercayai apa yang disampaikan kepadanya. Sistem ini adalah **pengawasan** (surveillance): tujuannya agar pihak lain tahu di mana pesawat berada, untuk pemanduan lalu lintas udara dan untuk pesawat di sekitarnya, berbeda dengan navigasi, yaitu pesawat mengetahui sendiri di mana posisinya, dan berbeda dengan komunikasi, yaitu berbicara dengan pilot. Dan sistem ini adalah **siaran** (broadcast): pesannya tidak memiliki alamat tujuan, tidak ada konfirmasi penerimaan, dan tidak ada enkripsi, dan siapa pun yang memiliki penerima dalam jangkauan mendengar hal yang persis sama, entah itu pusat kendali, pesawat penumpang lain, atau sebuah sekolah.

"Dependen" adalah kata yang mencemaskan para insinyur, dan kata yang paling layak dijelaskan. Radar melakukan pengukuran mandiri: jika instrumen pesawat salah, radar tidak terpengaruh. ADS-B mewarisi setiap kesalahan sistem navigasi pesawat itu sendiri, dan jika sistem itu tertipu atau gagal, posisi yang disiarkan salah dengan tingkat keyakinan yang sama. Karena itulah setiap pesan ADS-B membawa, di samping posisinya, pernyataan seberapa besar pesawat memercayai posisinya sendiri (kategori integritas dan akurasi yang akan kita temui di bab 5), dan karena itu pula radar belum dimatikan.

"Siaran" adalah kata yang memungkinkan kursus ini ada. Karena pesan dikirim tanpa enkripsi kepada semua orang, pesan itu didengar bukan hanya oleh pemanduan lalu lintas udara, tetapi oleh penerima mana pun yang disetel ke 1090 MHz, termasuk penerima yang mungkin Anda pasang di atap sekolah. Sifat yang sama ini juga menjadi sumber keterbatasan utama sistem, yang dibahas di bab 11: pesan yang dapat dibaca siapa pun juga merupakan pesan yang dapat dipalsukan siapa pun.

BAB 4

Bagaimana pesawat mengetahui posisinya

Segala sesuatu dalam ADS-B bertumpu pada pesawat yang mengetahui posisinya sendiri, jadi bab ini membahas navigasi satelit. Istilah umumnya adalah **GNSS**, Global Navigation Satellite System; GPS milik Amerika adalah yang paling dikenal, dan Galileo milik Eropa, GLONASS milik Rusia, serta BeiDou milik Tiongkok bekerja dengan prinsip yang sama. Setiap sistem adalah konstelasi sekitar 24 sampai 30 satelit yang mengorbit pada ketinggian sekitar 20.000 km, jauh di atas pesawat, masing-masing membawa jam

atom yang akurat hingga beberapa sepermiliar detik. Setiap satelit terus-menerus memancarkan sinyal radio yang pada dasarnya berkata, "ini satelit nomor N, posisiku sekian, dan waktu saat aku mengirim ini tepat T".

Penerima di pesawat mendengar sinyal itu sedikit kemudian, karena radio memerlukan waktu untuk merambat: pada 300.000 km/s, jarak 20.000 km dari satelit ditempuh dalam sekitar 67 seperseribu detik. Penerima membandingkan waktu yang tercantum dalam pesan dengan waktu tibanya. Selisihnya, dikalikan dengan kecepatan cahaya, adalah jarak ke satelit itu. Satu jarak menempatkan penerima di suatu tempat pada sebuah bola di sekeliling satelit itu. Dua bola berpotongan membentuk lingkaran; tiga bola berpotongan di dua titik, salah satunya biasanya mustahil (jauh di bawah tanah atau jauh di luar angkasa) dan dibuang. Jadi tiga satelit sudah cukup, seandainya penerima memiliki jam yang sempurna.

Kenyataannya tidak. Jam atom berharga puluhan ribu euro dan tidak akan muat; penerima memiliki jam kuarsa murah yang kesalahannya bisa jauh melebihi presisi waktu yang dibutuhkan. Di sinilah bagian yang elegan. Penerima memperlakukan kesalahan jamnya sendiri sebagai variabel tak diketahui keempat, di samping tiga koordinat posisinya, dan mendengarkan satelit keempat. Empat persamaan, empat variabel tak diketahui: penerima menghitung posisinya dan, sebagai hasil sampingan, mengoreksi jamnya sendiri hingga beberapa puluh nanodetik. Inilah sebabnya penerima satelit memerlukan setidaknya empat satelit yang terlihat, dan mengapa setiap penerima GNSS, secara kebetulan, juga merupakan salah satu jam paling akurat di dalam gedung.

Ada baiknya kita mencermati besarannya, karena besaran itu menjelaskan mengapa navigasi satelit sesungguhnya adalah latihan pengukuran waktu, dengan geometri sebagai pelengkap. Cahaya menempuh 30 sentimeter dalam satu nanodetik dan 300 meter dalam satu mikrodetik, sehingga kesalahan waktu sepersejuta detik menjadi kesalahan posisi 300 meter, dan akurasi beberapa meter dari penerima modern setara dengan pengukuran waktu pada tingkat sekitar sepuluh nanodetik. Ambil contoh konkret. Sebuah satelit membubuhkan waktu 12:00:00,000 000 000 pada sinyalnya; penerima pesawat mendengarnya pada 12:00:00,070 000 000. Waktu tempuhnya 0,070 s, sehingga jaraknya 0,070 x 300.000 km/s = 21.000 km. Seandainya jam penerima sendiri terlalu cepat satu mikrodetik saja, penerima akan menghitung 21.000,3 km, 300 meter terlalu jauh, dan kesalahan yang sama juga akan menyusup ke jarak setiap satelit lainnya. Kesalahan bersama itulah yang persis diungkap dan dihilangkan oleh satelit keempat.

Dua ketinggian, bukan satu

Satelit memberikan ketinggian di atas permukaan matematis Bumi, yaitu ketinggian *geometrik*. Namun ketinggian yang disiarkan pesawat untuk keperluan lalu lintas udara bukanlah yang itu. Yang disiarkan adalah **ketinggian barometrik**, yang diturunkan dari tekanan udara di luar pesawat, diukur oleh lubang kecil di badan pesawat yang disebut static port. Tekanan udara turun seiring ketinggian dengan cara yang diketahui (kira-kira 1 hPa per 8 meter di dekat permukaan tanah, lebih lambat di tempat yang lebih tinggi), dan setiap altimeter di dunia mengubah tekanan menjadi ketinggian menggunakan atmosfer standar yang sama, dengan acuan 1013,25 hPa di permukaan laut. Pada hari dengan tekanan yang tidak biasa, ketinggian barometrik setiap pesawat salah dengan besaran yang sama, dan justru itulah intinya: yang penting untuk pemisahan bukanlah tinggi sebenarnya di atas permukaan laut, melainkan bahwa dua pesawat yang sama-sama menunjukkan "flight level 350" benar-benar berjarak 300 meter dari

pesawat yang menunjukkan "flight level 340". ADS-B menyiarkan ketinggian barometrik dalam pesan posisinya, dengan langkah 25 kaki (7,6 m), dan secara terpisah menyiarkan selisih antara ketinggian itu dan ketinggian satelit, sehingga penerima dapat memperoleh keduanya.

BAB 5

Anatomi sebuah pesan

Pesan ADS-B yang digunakan pesawat penumpang di seluruh dunia adalah transmisi Mode S yang disebut **extended squitter**; "squitter" adalah istilah lama dunia radar untuk transmisi yang dikirim secara spontan, bukan sebagai jawaban, dan "extended" (diperpanjang) karena dengan 112 bit panjangnya dua kali jawaban Mode S yang asli. Para insinyur menulis "1090ES" untuk "1090 MHz extended squitter". Setiap transmisi berlangsung total 120 mikrodetik: *preambul* 8 mikrodetik, yaitu pola tetap empat pulsa yang memungkinkan penerima mengenali awal pesan dan menyinkronkan jamnya, diikuti 112 bit data dengan laju satu bit per mikrodetik.

Bagaimana satu bit dikirim: modulasi posisi pulsa

Setiap slot bit satu mikrodetik dibagi menjadi dua paruh. Pulsa energi radio di paruh pertama dan hening di paruh kedua berarti 1; hening lalu pulsa berarti 0. Dengan demikian selalu ada tepat satu pulsa per bit, apa pun datanya, dan penerima hanya perlu memutuskan paruh mana dari setiap slot yang lebih kuat. Skema ini, modulasi posisi pulsa, tahan terhadap jenis derau dan pelemahan (fading) yang dialami sinyal dalam perjalanannya dari transponder ke antena yang jauh, dan murah untuk didekode.

Empat bit dalam modulasi posisi pulsa: 1, 0, 1, 1



Setiap slot berdurasi 1 mikrodetik. Pulsa di paruh pertama: 1. Pulsa di paruh kedua: 0.

112 bit

DF	CA	alamat ICAO	ME - muatan data	PI
5 bit	3 bit	24 bit	56 bit	24 bit
format downlink	kapabilitas	identitas unik pesawat	posisi, ketinggian, kecepatan, tanda panggil, atau status, tergantung kode tipe di 5 bit pertamanya	pemeriksaan kesalahan (CRC)

Lima bit pertama, downlink format, menyatakan jenis pesan Mode S ini; nilai 17 berarti "ADS-B dari transponder Mode S". **Alamat ICAO** 24 bit adalah identitas permanen pesawat, yang diberikan saat pesawat didaftarkan: ada 2 pangkat 24, atau 16.777.216, alamat yang mungkin, yang dialokasikan dalam blok-blok kepada negara-negara oleh ICAO, badan penerbangan sipil PBB. Pesawat Belgia, misalnya, memiliki alamat dari 448000 sampai 44FFFF dalam heksadesimal. Berbeda dengan kode empat digit Mode A yang lama, alamat ini tidak pernah berubah dan tidak pernah dipakai bersama, sehingga penerima dapat memastikan pesawat mana yang sedang didengarnya sejak pesan pertama.

Bidang **ME** 56 bit adalah isi sebenarnya, dan lima bit pertamanya, *kode tipe*, menyatakan arti sisanya. Kode tipe 1 sampai 4 membawa tanda panggil (call sign) pesawat, seperti BEL1234 atau RYR7KL, sebagai delapan karakter enam bit. Kode 9 sampai 18 membawa posisi di udara dengan ketinggian barometrik; 20 sampai 22 hal yang sama dengan ketinggian satelit. Kode 19 membawa kecepatan: kecepatan darat yang diuraikan menjadi komponen timur-barat dan utara-selatan, laju vertikal, serta selisih antara ketinggian barometrik dan ketinggian satelit. Kode 28, 29, dan 31 membawa status: kode darurat, ketinggian yang dipilih, serta kategori integritas dan akurasi yang menyatakan sejauh mana posisi yang disiarkan dapat dipercaya ("NIC" bernilai 8, misalnya, menjanjikan bahwa posisi sebenarnya berada dalam jarak 185 m dari posisi yang dilaporkan, dengan probabilitas tinggi).

24 bit terakhir adalah **cyclic redundancy check** (pemeriksaan redundansi siklik), sebuah angka yang dihitung dari 88 bit sebelumnya melalui pembagian polinomial tetap. Penerima mengulangi perhitungan itu pada bit yang didekodenya; jika hasilnya tidak cocok, setidaknya satu bit rusak dalam perjalanan dan pesan itu dibuang. Karena pulsa satu mikrodetik mudah hilang akibat derau atau tumpang tindih dengan pesan dari pesawat lain, pemeriksaan inilah yang menjaga posisi yang kacau agar tidak muncul di layar pemandu. Sebuah pesan sungguhan, sebagaimana dicatat oleh penerima, terlihat seperti ini:

> `8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098`
>
> 8D: downlink format 17, kapabilitas 5. 4840D6: alamat ICAO, sebuah pesawat Belanda. 20…: kode tipe 4, pesan identifikasi, yang didekode menjadi tanda panggil KLM1023. 576098: pemeriksaan kesalahan.

Memuat Bumi ke dalam 34 bit

Pesan posisi hanya memiliki 17 bit untuk lintang dan 17 bit untuk bujur. Itu berarti 131.072 langkah mengelilingi seluruh bola Bumi, masing-masing sekitar 300 m di khatulistiwa: jauh dari cukup. ADS-B mengatasinya dengan **compact position reporting** (pelaporan posisi ringkas). Bumi dibagi menjadi zona-zona; 17 bit itu memberikan posisi yang sangat presisi (hingga sekitar 5 m) di dalam satu zona, tetapi tidak menyatakan zona yang mana. Pesawat bergantian menggunakan dua kisi zona yang sedikit berbeda, pesan "genap" dan "ganjil", dan penerima yang telah mendengar satu dari masing-masing dapat menentukan zonanya tanpa keraguan. Setelah itu, satu pesan saja sudah cukup untuk mengikuti pesawat, karena pesawat hampir tidak mungkin melompat ke zona lain dalam setengah detik. Ini trik cerdik yang melipatgandakan presisi yang berguna tanpa menambah bit.

Seberapa sering

Transponder dalam penerbangan mengirim pesan posisi dua kali sedetik, pesan kecepatan dua kali sedetik, dan tanda panggilnya setiap lima detik, ditambah pesan status dengan selang waktu lebih panjang, sehingga totalnya sekitar empat sampai lima extended squitter per detik. Masing-masing berlangsung 120 mikrodetik; transponder sebenarnya memancarkan ADS-B kurang dari seperseribu waktunya. Sepanjang sisa detik itu, transponder mendengarkan, dan menjawab, interogasi radar pada 1030 MHz serta pertanyaan sistem penghindaran tabrakan dari pesawat lain.

BAB 6 - FISIKA

Gelombang: radio sebagai cahaya tak terlihat

Pesan meninggalkan pesawat sebagai **gelombang radio**, dan gagasan paling berguna dalam kursus ini adalah bahwa gelombang radio dan seberkas cahaya adalah hal yang sama. Keduanya gelombang elektromagnetik: pola medan listrik dan medan magnet yang berosilasi bersama dan merambat melalui ruang dengan kecepatan cahaya, c, yaitu 299.792.458 meter per detik, atau kira-kira 300.000 km/s. Yang membedakan gelombang radio dari cahaya hijau, dari sinar-X di rumah sakit, atau dari gelombang mikro di oven dapur hanyalah seberapa cepat medan-medan itu berosilasi: **frekuensi**, f, diukur dalam hertz (osilasi per detik).

Karena gelombang merambat dengan kecepatan tetap, frekuensi menentukan jarak antara satu puncak dan puncak berikutnya, yaitu **panjang gelombang**, lambda. Dalam satu detik gelombang menempuh c meter dan menyelesaikan f osilasi, sehingga setiap osilasi menempati c / f meter:

$$c = f \times \lambda$$

Untuk ADS-B: lambda = 300.000.000 / 1.090.000.000 = 0,275 m. Gelombang antara pesawat dan antena Anda memiliki puncak yang berjarak 27,5 cm, kira-kira sepanjang penggaris sekolah.

Gelombang	Frekuensi	Panjang gelombang	Catatan
Radio siaran FM	100 MHz	3 m	Antena mobil hanya sebagian kecil dari ini
ADS-B / Mode S	1.090 MHz	27,5 cm	Juga dipakai untuk jawaban transponder radar
Ponsel (pita 4G)	1.800 MHz	17 cm	Tetangga dekat di spektrum
Wi-Fi, oven microwave	2.450 MHz	12 cm	Frekuensi sama, daya sangat berbeda
Cahaya hijau tampak	560.000.000 MHz	0,000 54 mm	Frekuensinya setengah juta kali lebih tinggi

Dua konsekuensi penting untuk semua pembahasan berikutnya. Pertama, karena gelombang ini adalah cahaya, ia merambat lurus kecuali ada sesuatu yang membelokkan atau menghalanginya, dan ia tidak menembus Bumi. Hal itu menentukan jangkauan sistem, pokok bahasan bab 7. Kedua, karena panjang gelombangnya 27,5 cm, struktur logam yang berinteraksi paling kuat dengannya, yaitu antena, berukuran dalam orde yang sama, pokok bahasan bab 8.

Mengapa radio bukan bunyi

Kerancuan paling umum, pada orang dewasa maupun anak-anak, adalah antara radio dan bunyi, mungkin karena "radio" adalah kotak yang mengeluarkan suara. Keduanya fenomena yang tidak berhubungan. Bunyi adalah gelombang tekanan di udara, rantai molekul yang mendorong tetangganya; bunyi memerlukan medium untuk merambat, bergerak dengan kecepatan 340 m/s, dan tidak dapat melintasi ruang hampa. Radio tidak memerlukan apa pun: radio melintasi ruang hampa antara satelit dan pesawat, dan bergerak hampir sejuta kali lebih cepat. Bunyi mesin pesawat dan pesan ADS-B-nya meninggalkan pesawat pada saat yang sama; pesan itu tiba di penerima sejauh 20 km dalam 67 mikrodetik, sedangkan bunyinya baru tiba satu menit penuh kemudian.

Mengapa 1090 MHz

Frekuensi ini adalah warisan. Perjanjian internasional pada 1950-an mencadangkan pita 960 sampai 1215 MHz untuk radionavigasi penerbangan, dan 1090 MHz menjadi frekuensi jawaban transponder radar sekunder. Ketika ADS-B dirancang, menggunakan kembali transponder yang sudah terpasang di setiap pesawat penumpang jauh lebih murah daripada memasang radio baru, sehingga ADS-B sekadar menjadi satu hal lagi yang diucapkan transponder Mode S pada 1090 MHz. Di Amerika Serikat, pesawat yang lebih kecil yang terbang di bawah sekitar 5.500 m boleh menggunakan sistem kedua sebagai gantinya, yaitu UAT pada 978 MHz, itulah sebabnya penerima di sana sering mendengarkan keduanya.

BAB 7 - FISIKA

Jangkauan: lengkungan Bumi dan melemahnya sinyal

Transponder memancar dengan daya puncak beberapa ratus watt. Seberapa jauh sinyal seperti itu dapat didengar? Ada dua hal yang sangat berbeda yang membatasinya, dan keduanya perlu dipisahkan: geometri, yang menetapkan batas tegas, dan daya, yang menetapkan batas lunak.

Horizon radio

Pada 1090 MHz, radio berperilaku seperti cahaya: merambat lurus dan tidak melengkung mengikuti Bumi. Karena itu antena di darat hanya dapat mendengar pesawat selama ada garis lurus di antara keduanya yang tidak melewati tanah. Bagi pengamat di permukaan, horizon adalah tempat garis itu tepat menyinggung Bumi. Makin tinggi pesawat, makin jauh titik singgung itu; makin tinggi antena, makin jauh lagi. Geometri garis singgung pada bola memberikan hasil sederhana: jarak ke horizon dalam kilometer kira-kira 3,57 kali akar kuadrat ketinggian dalam meter. Atmosfer sedikit membelokkan radio ke bawah, sehingga horizon memanjang sekitar 15 persen, maka para insinyur memakai 4,12 sebagai gantinya:

```
d (km) = 4.12 x ( sqrt(h aircraft) + sqrt(h antenna) )   heights in metres
```

Pesawat pada 11.000 m, antena di atap setinggi 20 m: 4,12 x (104,9 + 4,5) = 451 km. Pesawat pada 1.000 m, atap yang sama: 4,12 x (31,6 + 4,5) = 149 km. Pesawat di darat sejauh 15 km: sama sekali tidak terdengar, kecuali daratan di antaranya datar dan terbuka.



Hal ini menjelaskan bentuk khas cakupan sebuah penerima: lingkaran 400 km atau lebih untuk lalu lintas yang terbang tinggi, menyusut menjadi beberapa puluh kilometer untuk pesawat yang sedang mendekati landasan, dan hampir tidak ada untuk pesawat di darat kecuali di bandara terdekat. Hal ini juga

menjelaskan mengapa ketinggian penerima jauh lebih penting daripada kualitas penerima, dan mengapa bukit, gedung tinggi, atau bahkan sayap pesawat itu sendiri, ketika pesawat berbelok menjauhi Anda, dapat memutus sinyal seketika.

Hukum kuadrat terbalik

Di dalam horizon, sinyal melemah seiring jarak. Antena transponder memancar ke segala arah horizontal, sehingga dayanya tersebar di atas bola yang makin lama makin besar. Luas bola bertambah sebanding dengan kuadrat jari-jarinya, sehingga daya yang jatuh pada antena berukuran tetap berkurang sebanding dengan kuadrat jarak: dua kali lebih jauh, seperempat dayanya; sepuluh kali lebih jauh, seperseratusnya. Para insinyur menyatakannya sebagai *redaman lintasan* (path loss) dalam desibel, dan untuk 1090 MHz pada jarak 400 km nilainya sekitar 145 dB, artinya daya yang diterima sekitar 10 pangkat 14,5 kali lebih kecil daripada daya yang dipancarkan. Pulsa 250 watt tiba sebagai kira-kira sepersepuluh miliar miliwatt. Penerima yang baik dapat mendeteksinya, nyaris, itulah sebabnya horizon geometris dan batas daya kebetulan bertemu di beberapa ratus kilometer: sistemnya memang dirancang demikian.

Kedua batas itu saling berinteraksi dengan cara yang patut dipahami. Di dalam horizon, sinyal kuat dari pesawat dekat dan sinyal lemah dari pesawat jauh sama-sama terdekode sempurna, karena skema posisi pulsa dari bab 5 hanya menanyakan paruh mana dari setiap slot bit yang lebih kuat, bukan seberapa kuat. Sinyal tidak berangsur-angsur kehilangan kegunaannya saat pesawat menjauh; sinyal tetap dapat didekode hingga, di suatu tempat dekat horizon, geometri memutusnya atau derau di penerima akhirnya menenggelamkannya, dan jejaknya berhenti. Karena itulah peta cakupan memiliki tepi yang tajam, dan mengapa pesawat terjauh yang didengar sebuah penerima hampir selalu yang terbang paling tinggi.

BAB 8 - FISIKA

Antena: menangkap gelombang 27 sentimeter

Antena adalah sepotong konduktor yang dibentuk sedemikian rupa sehingga gelombang elektromagnetik yang lewat menggerakkan elektron di dalamnya secara serempak, menghasilkan arus bolak-balik yang sangat kecil yang dapat diperkuat oleh penerima. Kebalikannya terjadi di pemancar: arus bolak-balik di antena pesawat melontarkan gelombang. Efisiensi pertukaran ini bergantung pada ukuran konduktor relatif terhadap panjang gelombang. Kawat lurus paling kuat menanggapi, ia *beresonansi*, ketika panjangnya setengah panjang gelombang, sehingga arus yang mengalir bolak-balik di sepanjang kawat itu pas dengan osilasi gelombang, seperti ayunan anak yang didorong mengikuti iramanya sendiri. Untuk 1090 MHz, setengah panjang gelombang adalah 13,75 cm.

Bentuk praktis yang paling umum adalah **monopol seperempat gelombang**: batang vertikal sepanjang seperempat panjang gelombang, 6,9 cm, yang berdiri di atas permukaan konduktif, yaitu *bidang tanah* (ground plane). Bidang tanah berfungsi sebagai cermin, sehingga batang dan bayangannya bersama-sama berperilaku seperti antena setengah gelombang. Inilah sebabnya antena ADS-B di pesawat berupa bilah pendek setinggi beberapa sentimeter di badan pesawat, dengan badan pesawat sebagai bidang tanahnya, dan mengapa antena buatan penghobi berupa kawat pendek di atas tutup kaleng. Kawat dengan panjang yang salah tetap berfungsi, tetapi jauh kurang baik: "telinga logam" itu disetel.

Tiga sifat lain antena muncul dari fisikanya, dan masing-masing memiliki akibat yang terlihat. Yang pertama adalah **polarisasi**. Medan listrik gelombang elektromagnetik berosilasi dalam arah tertentu yang tegak lurus terhadap arah rambatnya, dan antena hanya menanggapi komponen medan yang sejajar dengan panjangnya sendiri. Antena pesawat dipasang vertikal, sehingga gelombang ADS-B tiba dengan polarisasi vertikal, dan antena penerima juga harus vertikal; jika dibaringkan, antena hampir tidak mendengar apa pun, seperti gelombang tali yang digoyang naik turun dihentikan oleh celah horizontal. Yang kedua adalah **pola radiasi**. Antena vertikal paling peka ke arah horizon dan sama sekali tidak peka di sepanjang sumbunya sendiri, sehingga sensitivitasnya dalam tiga dimensi berbentuk seperti donat dengan antena menembus lubangnya. Karena itu penerima rutin mendengar pesawat sejauh 300 km tanpa kesulitan, tetapi kehilangan pesawat yang melintas tepat di atasnya selama beberapa detik, hal yang patut diperhatikan di peta langsung mana pun. Menumpuk beberapa elemen resonan satu di atas yang lain membuat donat itu lebih pipih, memusatkan sensitivitas ke arah horizon, tempat pesawat-pesawat yang jauh berada, dengan mengorbankan arah atas; inilah yang dimaksud dengan **penguatan** (gain) antena, dan penguatan selalu merupakan pembagian ulang sensitivitas, tidak pernah penciptaan sensitivitas.

Sifat ketiga menyangkut apa yang berada di antara antena dan penerima. Antena tidak hanya menangkap 1090 MHz, tetapi setiap sinyal di sekitarnya, termasuk transmisi ponsel beberapa ratus megahertz jauhnya yang jauh lebih kuat, sehingga filter yang hanya meloloskan pita penerbangan dipasang paling depan. Sinyal kemudian harus merambat melalui kabel, dan pada 1090 MHz kabel koaksial kehilangan kira-kira separuh sinyal setiap sepuluh meter; solusinya adalah penguat berderau rendah (LNA) di antena, sebelum kabel, sehingga sinyal cukup kuat untuk bertahan dalam perjalanan, bukan di penerima, karena penguatan di sana akan ikut memperkuat derau kabel bersama sisa sinyalnya. Ini memang detail, tetapi detail inilah yang menentukan apakah penerima di atap sekolah mendengar pesawat di horizon atau hanya yang dekat.

BAB 9

Penerimaan dan dekode

Di antara antena dan sebuah titik di peta terdapat rantai lima tahap. Antena mengubah gelombang yang lewat menjadi arus bolak-balik beberapa mikrovolt. Filter dan penguat berderau rendah mempertahankan pita 1090 MHz, menolak semua yang lain, dan memperkuat sinyal seribu kali. Radio yang didefinisikan perangkat lunak menyetel ke frekuensi itu dan mencuplik sinyal dua juta kali per detik, mengubahnya menjadi aliran angka. Dekoder mencari pola preambul dalam aliran itu, membaca 112 bit, memeriksa paritas, dan mendekode bidang-bidangnya. Dan pelacak (tracker) mengumpulkan pesan dari setiap pesawat menjadi satu catatan yang terus diperbarui: posisi, jejak, label.

Tahap yang luar biasa adalah tahap ketiga. Hingga sekitar 2010, mendekode 1090 MHz memerlukan perangkat keras khusus seharga ribuan euro. Lalu para penghobi menemukan bahwa tuner televisi USB seharga 20 euro berisi cip yang dapat diperintah untuk menyetel ke frekuensi apa pun dan menyerahkan sinyal mentahnya ke komputer. **Radio yang didefinisikan perangkat lunak** (software-defined radio) ini mengubah persoalan radio menjadi persoalan pemrograman: laptop atau Raspberry Pi menerima aliran dua juta angka per detik yang menggambarkan kekuatan sinyal, dan perangkat lunak gratis mencari pola

preambul, mengukur paruh mana dari setiap slot mikrodetik yang lebih kuat, menyusun 112 bit, menghitung CRC, dan mencetak bidang-bidangnya. Proyek penerima dalam paket sekolah menengah adalah persis rantai ini, dan sebuah sekolah dapat merakitnya dengan biaya di bawah 100 euro.

Tahap pelacak adalah tempat aliran pesan menjadi pengetahuan. Ingatlah, satu pesan posisi bersifat ambigu sampai pesan genap dan pesan ganjil telah dipasangkan. Kecepatan tiba terpisah dari posisi, tanda panggil terpisah lagi, dan pelacak menyatukannya berdasarkan alamat ICAO, membuang apa pun yang gagal dalam pemeriksaan kesalahan, dan menyimpan keadaan terakhir yang diketahui dari setiap pesawat. Jika tidak ada pesan yang tiba selama satu menit, biasanya karena pesawat telah turun di bawah horizon, jejaknya kedaluwarsa.

BAB 10

Dari satu penerima ke peta satu benua

Satu penerima mendengar lingkaran langit selebar beberapa ratus kilometer. Peta Eropa memerlukan ratusan penerima, dan yang berguna bukan yang berada di kota, melainkan yang tersebar: di pesisir, di lembah, di pulau-pulau, di mana pun lingkaran penerima lain tidak menjangkau. Setiap penerima mengirim pesan yang telah didekodenya, masing-masing dengan cap waktu kedatangan, melalui internet ke sebuah layanan pusat. Layanan itu melakukan *agregasi*: pesan yang sama dari pesawat yang terbang tinggi biasanya datang dari sepuluh atau dua puluh penerima sekaligus, dan duplikatnya harus dikenali dan digabungkan. Layanan itu juga memeriksa: posisi yang bertentangan dengan pandangan setiap penerima di sekitarnya tentang pesawat yang sama kemungkinan besar adalah kesalahan dekode atau transponder yang rusak, dan akan ditandai atau dibuang.

Multilaterasi: menemukan pesawat yang tidak menyebutkan posisinya

Tidak setiap pesawat menyiarkan posisi. Transponder yang lebih tua menjawab radar dengan identitas dan ketinggian tetapi tidak memiliki masukan satelit; sebagian pesawat sengaja tidak mengirim posisi sama sekali. Namun transmisi 1090 MHz mereka tetap sampai ke darat, dan jaringan dapat menentukan lokasinya dengan membalik prinsip navigasi satelit. Jika empat penerima dengan jam yang tersinkronisasi secara presisi masing-masing mencatat saat transmisi yang sama tiba, selisih antara saat-saat itu mengungkap selisih jarak: pesan yang mencapai penerima A satu mikrodetik sebelum penerima B dikirim dari titik yang 300 m lebih dekat ke A daripada ke B. Semua titik dengan sifat itu terletak pada sebuah permukaan lengkung, hiperboloid, di antara A dan B. Tiga permukaan seperti itu, dari empat penerima, berpotongan di posisi pesawat. Inilah **multilaterasi**, dan metode ini menuntut ketepatan waktu sekitar sepersepuluh mikrodetik, 30 m, di antara penerima yang terpisah ratusan kilometer, yang diperoleh penerima dari satelit yang sama dengan yang digunakan pesawat.

Gagasan yang sama, dua kali
Navigasi satelit: satu penerima, empat pemancar yang posisinya diketahui, hitung posisi penerima. Multilaterasi: satu pemancar, empat penerima yang posisinya diketahui, hitung posisi pemancar. Pada keduanya, yang sebenarnya diukur adalah waktu, dan 1 mikrodetik sama dengan 300 meter.

BAB 11

Untuk apa sistem ini digunakan, dan di mana kekurangannya

Pemanduan lalu lintas udara adalah pengguna pertama. Di seluruh Eropa, para pemandu kini melihat gambaran gabungan di mana ADS-B, dengan pembaruan dua kali sedetik dan akurasi setingkat satelit, dipadukan dengan radar dan multilaterasi; di tempat yang tidak pernah dijangkau radar, di atas Atlantik Utara, Arktik, Sahara, dan sebagian besar samudra, pesan ADS-B ditangkap oleh penerima yang dibawa satelit komunikasi orbit rendah, sehingga pesawat yang menyeberangi Atlantik kini dapat diberi jarak pisah jauh lebih rapat daripada sebelumnya. Pesawat adalah pengguna kedua: pesawat penumpang dengan "ADS-B In" menampilkan lalu lintas di sekitarnya kepada awaknya dan memasukkannya ke sistem penghindaran tabrakan. Bandara menggunakannya untuk melacak pesawat dan kendaraan di darat saat berkabut. Para peneliti menggunakan data terbukanya untuk mempelajari kebisingan, konsumsi bahan bakar, jejak kondensasi (contrail), dan keterlambatan. Dan penerima di atap sekolah, dalam skala kecil, ikut ambil bagian dalam semua ini.

Kelemahan sistem ini muncul langsung dari rancangannya, dan masing-masing patut dipahami, bukan sekadar didaftar. Karena pesan disiarkan tanpa perlindungan, tidak dienkripsi dan tidak ditandatangani, tidak ada apa pun dalam pesan itu sendiri yang membuktikan bahwa pesan itu berasal dari pesawat. Sebuah pemancar di darat dapat, secara ilegal, menyiarkan pesan yang sempurna bentuknya tentang pesawat yang tidak ada, dan penerima akan mendekodenya tanpa keberatan. Yang melindungi sistem bukanlah pesannya, melainkan konteks di sekitarnya: pesawat hantu tidak akan muncul di radar, tidak akan ditemukan oleh multilaterasi, dan tidak akan berperilaku seperti lalu lintas sungguhan, dan pusat-pusat kendali terus-menerus melakukan pemeriksaan silang. Versi protokol dengan tanda tangan kriptografis telah dibahas bertahun-tahun; hambatannya lebih bersifat praktis daripada teknis, karena setiap transponder di dunia harus diganti.

Karena posisinya bergantung pada penerima satelit pesawat, apa pun yang mengganggu navigasi satelit juga mengganggu ADS-B. Pengacauan (jamming) dan pemalsuan (spoofing) sinyal satelit telah menjadi hal yang umum di dekat zona konflik, dan pesawat yang terbang melalui area seperti itu mungkin tidak dapat menghitung posisi, atau mungkin menghitung posisi yang salah. Pesannya kemudian membawa kategori integritas yang menurun, sistem pemandu menandainya, dan radar, pengukuran mandiri yang memang tidak pernah dimaksudkan untuk sepenuhnya digantikan oleh ADS-B, mengambil alih. Dengan demikian hubungan keduanya bukanlah hubungan penerus dan pendahulu, melainkan mitra dengan kelemahan yang saling melengkapi.

Karena kewajibannya mencakup pesawat penumpang dan sebagian besar pesawat yang lebih besar, tetapi tidak semua yang terbang, peta ini memang tidak lengkap. Pesawat ringan di luar wilayah udara terkendali, pesawat layang, balon udara, dan banyak pesawat militer mungkin sama sekali tidak membawa ADS-B, dan sebagian pesawat ringan menggunakan sistem lain yang tidak didengar oleh penerima 1090 MHz. Dan karena siaran itu mengidentifikasi pesawat, siaran itu dapat mengidentifikasi pemiliknya: mengikuti jet pribadi tertentu pada dasarnya berarti mengikuti orang tertentu, sehingga muncul program yang menyamarkan registrasi pesawat yang pemiliknya memintanya, dan perdebatan berkelanjutan tentang apakah informasi yang disiarkan pesawat kepada dunia juga bisa bersifat pribadi. Perdebatan itu bagus untuk diajukan kepada siswa yang lebih besar, karena fisika tidak memberikan jawabannya.

BAB 12

Sejarah singkat

1935 sampai 1945

Radar primer dikembangkan di Inggris, Jerman, dan Amerika Serikat; menjelang akhir perang, transponder "identification friend or foe" (identifikasi kawan atau lawan) menjawab pulsa radar dengan balasan berkode, cikal bakal radar sekunder.

1950-an sampai 1960-an

Radar sekunder sipil distandardisasi: interogasi 1030 MHz, jawaban 1090 MHz, kode identitas Mode A, dan ketinggian Mode C.

1980-an

Mode S, dengan alamat 24 bit yang unik dan pesan data, dikembangkan di MIT Lincoln Laboratory dan diadopsi oleh ICAO. GPS mulai beroperasi untuk pengguna sipil.

1990-an sampai 2000-an

ADS-B didefinisikan dan diuji coba, terutama di Alaska, tempat cakupan radar mustahil dan kecelakaan sering terjadi. Extended squitter 1090 MHz distandardisasi secara internasional.

2010-an

Radio murah yang didefinisikan perangkat lunak menjadikan penerimaan sebagai hobi; jaringan relawan dengan ribuan penerima bermunculan. Penerima diluncurkan dengan satelit untuk cakupan di atas samudra.

2020

ADS-B menjadi wajib bagi sebagian besar pesawat di wilayah udara terkendali di Amerika Serikat (Januari) dan Uni Eropa (Juni, dengan masa transisi hingga akhir tahun). Langit mulai berbicara, di mana-mana, sepanjang waktu.

Glosarium

ADS-B
Automatic Dependent Surveillance - Broadcast. Pesawat yang menyiarkan posisinya sendiri.

Ketinggian barometrik
Ketinggian yang diturunkan dari tekanan udara, menggunakan atmosfer standar; inilah yang dilaporkan pesawat.

CPR
Compact position reporting (pelaporan posisi ringkas), skema genap/ganjil yang memuat posisi presisi ke dalam 34 bit.

CRC
Cyclic redundancy check (pemeriksaan redundansi siklik), pemeriksaan kesalahan 24 bit di akhir setiap pesan.

Squitter diperluas (Extended squitter)
Transmisi spontan Mode S sepanjang 112 bit yang membawa ADS-B.

GNSS
Global navigation satellite system (sistem satelit navigasi global): GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou.

Alamat ICAO
Identitas permanen 24 bit dari transponder sebuah pesawat.

Mode S
Standar radar sekunder selektif yang menjadi dasar ADS-B.

Multilaterasi
Menentukan lokasi pemancar dari selisih waktu tiba sinyal di beberapa penerima.

Redaman lintasan
Melemahnya sinyal seiring jarak, mengikuti hukum kuadrat terbalik.

Horizon radio
Jarak terjauh di mana garis lurus antara antena dan pesawat masih tidak terhalang Bumi.

SDR
Software-defined radio (radio yang didefinisikan perangkat lunak): tuner yang menyerahkan cuplikan sinyal mentah ke komputer untuk didekode.

SSR
Secondary surveillance radar (radar pengawasan sekunder): darat menginterogasi, transponder menjawab.

Transponder
Radio pesawat yang menjawab radar dan memancarkan ADS-B pada 1090 MHz.

Panjang gelombang
Jarak antara puncak-puncak gelombang yang berurutan: c / f, 27,5 cm pada 1090 MHz.

SELANJUTNYA

Dari teori ke praktik: rakit penerimanya

Dua belas bab telah menjelaskan sebuah sistem yang kini dapat Anda genggam. Lokakarya praktik mengubahnya menjadi pekerjaan satu sore: apa yang perlu dibeli dengan 100 sampai 150 euro, cara membuat dan memasang antena, cara menyiapkan Raspberry Pi dan memasang feeder Dataero, serta cara melihat pesawat yang Anda dengar muncul di peta langsung, tercatat atas nama stasiun Anda. Setiap bab di atas memiliki pengukuran yang menantinya di sana: horizon radio dibandingkan dengan pesawat sungguhan, hukum kuadrat terbalik di kolom sinyal, irama harian langit.

Buka lokakarya praktik `https://radar.dataero.eu/id/learning/workshop`