FISIKA DAN INFORMATIKA - USIA 12 SAMPAI 18 TAHUN

Memecahkan kode langit

Baris heksadesimal di bawah ini adalah pesan sungguhan, dikirim oleh pesawat sungguhan sekitar dua kali per detik. Dalam 112 sepersejuta detik, pesan ini mengumumkan siapa pesawat itu dan, dalam pesan-pesan pendampingnya, di mana posisinya, seberapa tinggi dan seberapa cepat. Kursus ini membahas semua yang perlu kamu ketahui untuk memahaminya: fisika gelombang yang membawanya, pengukuran waktu yang memberi pesawat posisinya, pengodean yang memadatkannya ke dalam 112 bit, geometri yang membatasi seberapa jauh pesan itu bisa didengar, dan penerima yang bisa kamu rakit sendiri untuk mendengarnya.

Belajar - https://radar.dataero.eu/id/learning/ages-12-18/student 2026-11-21

DAFTAR ISI

Apa itu ADS-B, dalam satu halaman

PELAJARAN 1 Gelombang: radio sebagai cahaya tak terlihat

PELAJARAN 2 Waktu dan posisi: bagaimana pesawat tahu di mana ia berada

PELAJARAN 3 Pesan: 112 bit, dan cara kesalahan terdeteksi

PELAJARAN 4 Jangkauan: kelengkungan Bumi dan hukum kuadrat terbalik

PELAJARAN 5 Antena dan penerima: dari gelombang 27 sentimeter menjadi titik di peta

Tantangan

BERIKUTNYA Rakit sendiri

Apa itu ADS-B, dalam satu halaman

`8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098`

Satu extended squitter seperti yang dicatat oleh penerima: 28 digit heksadesimal, 112 bit. Pada pelajaran 3 kamu akan bisa membaca setiap bagiannya.

Pengatur lalu lintas udara harus tahu di mana setiap pesawat berada, terus-menerus, agar pesawat-pesawat tetap berjauhan: pesawat penumpang yang sedang jelajah menempuh 250 m setiap detik, dan aturan separasi mewajibkan jarak 300 m secara vertikal atau 9 km secara horizontal antarpesawat di bawah kendali radar. Selama tujuh puluh tahun, caranya adalah radar: stasiun darat mengirim pulsa dan mengukur waktu pantulannya, atau, dalam bentuk sekunder yang lebih baik, menginterogasi transponder di pesawat yang menjawab pada 1090 MHz dengan identitas dan ketinggian. Radar punya keterbatasan: ia butuh daya yang sangat besar, ia hanya melihat setiap pesawat sekali per putaran antena, dan ia tidak bisa menjangkau lautan atau pegunungan.

ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, membalik masalahnya. Setiap pesawat modern membawa penerima navigasi satelit sehingga tahu posisinya sendiri sampai ketelitian beberapa meter. ADS-B cukup membuat transponder pesawat mengumumkan posisi itu, bersama identitas, ketinggian,

dan kecepatannya, sekitar dua kali per detik, pada 1090 MHz, tanpa ditujukan kepada siapa pun secara khusus. Automatic (otomatis) karena tidak ada yang memicunya; dependent (bergantung) karena informasinya sepenuhnya berasal dari instrumen pesawat itu sendiri; surveillance (pengawasan) karena tujuannya adalah mengetahui di mana pesawat berada; broadcast (siaran) karena dikirim terbuka kepada siapa saja yang mendengarkan. Sejak 2020, ADS-B wajib bagi sebagian besar pesawat di wilayah udara Eropa dan Amerika. Pengatur lalu lintas udara memakainya bersama radar, pesawat lain memakainya untuk saling melihat, dan penerima USB seharga 25 euro di atap sekolah mendengar pesan yang persis sama.

Untuk memahami sistem ini, kamu harus memahami lima hal, dan masing-masing menjadi satu pelajaran: gelombang elektromagnetik yang membawa pesan; pengukuran waktu yang memberi pesawat posisinya, dan yang memungkinkan sebuah jaringan menemukan pesawat yang tidak mau menyebutkan posisinya; pesan digital dan cara kesalahan di dalamnya terdeteksi; geometri dan energi yang membatasi seberapa jauh pesan itu bisa didengar; serta antena dan penerima yang mengubahnya kembali menjadi data. Ceritanya secara lengkap ada di kursus referensi; baca bab 3 dan 5 sebelum pelajaran 3, serta bab 6 sampai 8 sebelum pelajaran 4 dan 5.

PELAJARAN 1

Gelombang: radio sebagai cahaya tak terlihat

Pesan meninggalkan pesawat sebagai gelombang elektromagnetik: medan listrik dan medan magnet yang berosilasi dan merambat melalui ruang tanpa medium, dengan kecepatan cahaya c = 3.00 x 10^8 m/s. Cahaya tampak adalah fenomena yang sama pada frekuensi yang lebih tinggi; matamu peka terhadap kira-kira 4 sampai 8 x 10^14 Hz, sedangkan ADS-B dipancarkan pada 1.09 x 10^9 Hz, setengah juta kali lebih rendah. Tidak ada perbedaan jenis antara pesan pesawat dan cahaya dari layar ini, yang berbeda hanya frekuensinya.

Karena gelombang merambat dengan kecepatan tetap, frekuensinya menentukan panjang gelombangnya. Dalam satu detik gelombang maju sejauh c meter dan menyelesaikan f siklus, jadi setiap siklus menempati c / f meter: c = f x lambda. Untuk ADS-B, lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. Gelombang yang melintas antara pesawat dan antenamu punya puncak-puncak yang berjarak 27.5 cm, di antara sinyal ponsel (17 cm) dan stasiun radio FM (3 m) pada spektrum. Gambarlah spektrum itu sendiri, pada sumbu logaritmik dari 10^6 Hz sampai 10^18 Hz, lalu tempatkan di sana radio FM, ADS-B, ponsel, Wi-Fi, inframerah, cahaya tampak, dan sinar-X. Gelombang pesawat ternyata berada di antara benda-benda yang ada di sakumu.

```
c = f x lambda
```

3.00 x 10^8 m/s = 1.09 x 10^9 Hz x 0.275 m

Gelombang radio bukanlah bunyi. Bunyi adalah gelombang tekanan dalam suatu medium, merambat 343 m/s di udara, 1 500 m/s di air, dan sama sekali tidak merambat di ruang hampa. Radio adalah cahaya: ia tidak butuh medium, itulah sebabnya ia bisa melintasi ruang hampa dari satelit ke pesawat, dan ia lebih cepat dengan faktor 3.00 x 10^8 / 343, sekitar 875 000. Jika sebuah pesawat berjarak 30 km memancarkan bunyi dan pesan pada saat yang sama, pesannya tiba dalam 100 mikrodetik; bunyinya tiba 87 detik kemudian, saat pesawat sudah terbang 22 km. Gelombang tali punya sifat-sifat penting

yang sama dengan cahaya, yaitu panjang gelombang, frekuensi, dan kecepatan tetap, sehingga goyangan yang lebih cepat menghasilkan gelombang yang lebih pendek, bukan yang lebih cepat; bedanya, gelombang tali butuh tali.

Satu sifat gelombang akan penting di pelajaran 5: polarisasinya. Medan listrik berosilasi ke arah tertentu yang tegak lurus terhadap arah rambat. Antena pesawat dipasang vertikal, jadi gelombang ADS-B terpolarisasi vertikal, dan antena penerima yang diletakkan mendatar hampir tidak menangkapnya, seperti gelombang tali yang digoyang vertikal tertahan oleh celah horizontal. Coba tebak sekarang apa yang terjadi pada jangkauan penerimamu jika antenanya mendatar; kamu akan mengujinya dalam proyek.

PELAJARAN 2

Waktu dan posisi: bagaimana pesawat tahu di mana ia berada

Posisi di setiap pesan ADS-B berasal dari navigasi satelit, dan navigasi satelit adalah pengukuran waktu. Sekitar tiga puluh satelit per sistem (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) mengorbit pada ketinggian kira-kira 20 200 km, masing-masing dengan jam atom, masing-masing memancarkan sinyal yang menyebutkan posisinya sendiri dan saat tepat pemancarannya. Penerima di pesawat mencatat saat sinyal tiba. Selisihnya, dikalikan c, adalah jarak ke satelit itu; dari satelit yang tepat di atas kepala, sinyal butuh 20 200 / 300 000 = 0.0673 s. Satu jarak menempatkan penerima pada sebuah bola di sekitar satelit itu; dua bola berpotongan membentuk lingkaran; tiga bola berpotongan di dua titik, salah satunya jauh dari Bumi dan dibuang. Tiga satelit sudah cukup jika penerima punya jam yang sempurna. Kenyataannya, ia hanya punya kristal kuarsa yang bergeser beberapa mikrodetik, dan satu mikrodetik sama dengan 300 m jarak. Jadi penerima memperlakukan kesalahan jamnya sendiri sebagai variabel tak diketahui keempat dan memakai satelit keempat: empat persamaan, empat variabel (x, y, z, dan selisih jam), diselesaikan terus-menerus. Sebagai hasil sampingan, setiap penerima satelit menjaga waktu sampai ketelitian puluhan nanodetik, dan paruh kedua pelajaran ini bergantung pada hal itu.

Ingat baik-baik besarannya: cahaya menempuh 0.3 m per nanodetik dan 300 m per mikrodetik. Posisi dengan ketelitian 3 m berarti pengukuran waktu dengan ketelitian 10 ns. Satelit yang jamnya 1 mikrodetik terlalu cepat akan menggeser setiap penerima yang memakainya sejauh 300 m sepanjang garis ke arah satelit itu, itulah sebabnya jam satelit dikoreksi dari darat beberapa kali sehari.

Pesawat membawa dua ketinggian. Solusi satelit memberikan tinggi geometris di atas elipsoid referensi. Tetapi ketinggian yang disiarkannya untuk keperluan lalu lintas udara adalah ketinggian barometrik: tekanan udara di sebuah lubang pada badan pesawat, dikonversi menjadi ketinggian melalui Atmosfer Standar Internasional (ISA), yang mengasumsikan 1013.25 hPa dan 15 derajat C di permukaan laut serta penurunan suhu 6.5 derajat per kilometer. Ketika tekanan sebenarnya berbeda dari standar, ketinggian barometrik setiap pesawat salah dengan jumlah yang sama, dan justru itulah yang dibutuhkan untuk separasi: dua pesawat yang membaca flight level 350 dan 360 terpisah 1 000 ft, apa pun cuacanya. Pesan posisi membawa ketinggian barometrik dalam langkah 25 kaki; pesan kecepatan membawa selisih antara tinggi barometrik dan geometris. Jika kamu punya spreadsheet, balikkan rumus p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255 dan periksa bahwa pada 11 000 m tekanannya sekitar 227 hPa, kurang dari seperempat tekanan di permukaan laut: di udara tempat pesawat penumpang terbang, kamu tidak akan tetap sadar.

Sekarang balik seluruh gagasannya. Sebagian pesawat memancar pada 1090 MHz tanpa posisi: transponder lama yang menjawab radar hanya dengan identitas dan ketinggian, atau pesawat yang penerimaan satelitnya diganggu (jamming). Sebuah jaringan penerima tetap bisa menemukan posisinya dengan multilaterasi. Misalkan empat penerima dengan jam yang tersinkronisasi masing-masing mencatat waktu tiba dari pancaran yang sama. Pesan yang mencapai penerima A satu mikrodetik lebih dulu daripada penerima B dikirim dari titik yang 300 m lebih dekat ke A daripada ke B, dan semua titik seperti itu membentuk hiperboloid dengan A dan B sebagai titik fokusnya. Tiga pasangan independen dari empat penerima menghasilkan tiga hiperboloid, yang berpotongan di posisi pesawat. Ini adalah masalah satelit dengan yang diketahui dan yang tidak diketahui ditukar: di sana, satu penerima dan empat pemancar yang diketahui; di sini, satu pemancar dan empat penerima yang diketahui. Pada keduanya, yang diukur adalah waktu, dan 1 mikrodetik sama dengan 300 m. Penerima-penerima itu menyinkronkan jamnya sampai sekitar 100 ns dari satelit yang sama dengan yang dipakai pesawat.

Kamu bisa melakukannya dengan bunyi. Tiga orang dengan stopwatch berdiri di titik-titik yang sudah diukur di lapangan; orang keempat bersembunyi dan bertepuk tangan sekali; masing-masing mencatat jeda waktunya. Dengan bunyi pada 343 m/s, selisih 0.1 s sama dengan 34 m, dan gambar berskala dengan posisi coba-coba, atau sketsa hiperbolanya, akan menemukan si penepuk tangan. Lalu tanyakan seberapa teliti stopwatch itu harus bekerja untuk melakukan hal yang sama dengan radio sejauh 200 km, dan kamu akan mengerti mengapa jaringan itu butuh waktu atom.

PELAJARAN 3

Pesan: 112 bit, dan cara kesalahan terdeteksi

Transponder mengirim ADS-B sebagai Mode S extended squitter: preambul 8 mikrodetik, lalu 112 bit data dengan kecepatan satu bit per mikrodetik. Preambul adalah pola tetap berupa empat pulsa pada 0, 1, 3.5, dan 4.5 mikrodetik, dan tugasnya menjawab pertanyaan yang mungkin belum terpikir olehmu: di saluran yang penuh derau dan pesawat lain, bagaimana penerima tahu bahwa sebuah pesan sudah dimulai, dan kapan setiap bit dimulai? Dekoder terus-menerus mencari pola itu, dan ketika melihatnya, ia tahu keduanya. Setiap protokol digital yang kamu pakai, dari Wi-Fi sampai kode QR, punya padanannya.

Pemancar hanya bisa menyala atau mati; bagaimana ia mengirim 1 atau 0? ADS-B memakai modulasi posisi pulsa. Setiap slot bit satu mikrodetik dibagi menjadi dua bagian: pulsa di paruh pertama lalu hening di paruh kedua berarti 1; hening lalu pulsa berarti 0. Selalu ada tepat satu pulsa per bit. Pikirkan mengapa cara ini lebih baik daripada "ada pulsa berarti 1, tidak ada pulsa berarti 0". Penerima tidak pernah kehilangan patokan waktunya, bahkan pada deretan nol yang panjang, yang dalam skema sederhana itu tidak bisa dibedakan dari hening. Dan penerima menentukan setiap bit dengan bertanya paruh mana yang lebih kuat, bukan apakah pulsa melewati suatu batas tetap, sehingga sinyal lemah dari 400 km bisa didekode sama andalnya dengan sinyal kuat dari atas kepala.

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



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

Ke-112 bit itu tersusun sebagai berikut, dan kamu sebaiknya bisa menuliskannya kembali dari ingatan. Bit 1 sampai 5: format downlink, 17 untuk ADS-B dari transponder. Bit 6 sampai 8: kode kemampuan (capability). Bit 9 sampai 32: alamat ICAO 24 bit, identitas permanen pesawat yang diberikan saat registrasi; ada 2^24 = 16 777 216 alamat, yang dibagikan kepada negara-negara dalam blok, dan blok Belgia adalah 448000 sampai 44FFFF dalam heksadesimal. Bit 33 sampai 88: bidang pesan 56 bit, yang lima bit pertamanya, kode jenis (type code), menyatakan isi 51 bit lainnya. Kode jenis 1 sampai 4 membawa callsign sebagai delapan karakter 6 bit, masing-masing 64 simbol. Kode jenis 9 sampai 18 membawa posisi di udara: 12 bit ketinggian barometrik dalam langkah 25 kaki, penanda genap/ganjil, dan masing-masing 17 bit lintang dan bujur yang dikodekan. Kode jenis 19 membawa kecepatan sebagai komponen kecepatan darat timur-barat dan utara-selatan, laju vertikal, dan selisih tinggi barometrik-geometris. Bit 89 sampai 112: paritas 24 bit. Periksa hitungannya: 12 bit ketinggian dengan langkah 25 ft mencakup 102 400 ft; 17 bit yang dipakai secara sederhana untuk 180 derajat lintang hanya memberi resolusi 1.4 km. Posisinya lebih teliti dari itu berkat compact position reporting (CPR): ke-17 bit memberikan posisi di dalam sebuah zona sampai beberapa meter, tetapi tidak menyebutkan zonanya, dan pesawat bergantian antara dua kisi zona, genap dan ganjil. Penerima yang sudah mendengar masing-masing satu bisa menentukan zonanya tanpa keraguan, lalu melacak dari pesan tunggal. Ketelitian lebih tinggi dari bit yang sama, dibayar dengan waktu.

DF 5 bit format downlink	**CA** 3 bit kemampuan	**alamat ICAO** 24 bit identitas unik pesawat	**ME - muatan pesan** 56 bit posisi, ketinggian, kecepatan, callsign atau status, tergantung kode jenis di 5 bit pertamanya	**PI** 24 bit pemeriksaan kesalahan (CRC)

Bedah pesan sungguhan dari bagian atas halaman ini. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 terdiri atas 28 digit heksadesimal, 112 bit. Dua digit pertama, 8D, adalah 1000 1101 dalam biner; lima bit pertama, 10001, adalah 17, jadi ini ADS-B dari transponder, dan tiga bit berikutnya, 101, memberi capability 5. Enam digit berikutnya, 4840D6, adalah alamat ICAO, yang menurut tabel alokasi berada di Belanda. Pasangan digit berikutnya, 20, diawali dengan 00100, kode jenis 4, pesan identifikasi, dan mendekode karakter-karakter 6 bit berikutnya menghasilkan callsign KLM1023. Enam digit terakhir, 576098, adalah paritas. Dengan spreadsheet atau beberapa baris kode, kamu bisa melakukan seluruh pendekodean, dan tujuan pelajaran ini adalah agar kamu bisa melihat sebaris heksadesimal lalu berkata "pesawat KLM yang mengumumkan penerbangan 1023".

Paritas paling layak dipikirkan. Di atas bandara yang sibuk, pancaran dari pesawat-pesawat yang berbeda terus-menerus saling tumpang tindih di penerima, dan pulsa-pulsa tertentu hilang tertutup derau; dekoder pasti sesekali menyusun bit yang salah. Ke-24 bit terakhir adalah cyclic redundancy check (CRC): ke-88 bit pesan diperlakukan sebagai satu bilangan biner panjang dan dibagi, dalam aritmetika yang pengurangannya berupa exclusive-or (XOR), oleh polinomial pembangkit tetap sepanjang 25 bit; sisanya adalah CRC. Penerima mengulangi pembagian itu pada bit yang didekodenya. Satu bit yang terbalik, dua bit, atau rentetan kesalahan sepanjang sampai 24 bit akan mengubah sisanya, dan pesan itu ditolak. Coba CRC 4 bit pada pesan 8 bit dengan tangan untuk melihat cara kerjanya, lalu, jika kamu bisa memprogram, terapkan CRC-24 yang sebenarnya dan pastikan bahwa contoh pesan itu lolos dan bahwa membalik satu bit mana pun membuatnya gagal. Inilah deteksi kesalahan seperti yang dilakukan setiap sistem modern, dalam konteks di mana kesalahan yang terlewat bisa menampilkan pesawat hantu di layar pengatur lalu lintas udara.

PELAJARAN 4

Jangkauan: kelengkungan Bumi dan hukum kuadrat terbalik

Seberapa jauh penerima bisa mendengar pesawat? Ada dua batas yang berbeda, dan sebaiknya keduanya dipisahkan. Yang pertama adalah batas geometris. Pada 1090 MHz, radio tidak membelok mengikuti lengkung Bumi; ia merambat dalam garis lurus, jadi penerima hanya mendengar pesawat yang berada di atas cakrawalanya, yaitu pesawat yang garis lurusnya ke antena tidak terhalang tanah. Turunkan jarak cakrawalanya. Antena pada ketinggian h di atas bola berjari-jari R melihat cakrawala di titik tempat garis pandangnya menyinggung bola; garis singgung dan kedua jari-jari membentuk sudut siku-siku di titik singgung, jadi d^2 + R^2 = (R + h)^2, yang menghasilkan d^2 = 2Rh + h^2, dan karena h sangat kecil dibandingkan R, d = sqrt(2Rh). Dengan R = 6 371 km dan h dalam meter, d (km) = 3.57 sqrt(h). Atmosfer sedikit membelokkan radio ke bawah karena indeks biasnya menurun seiring ketinggian; koreksi standarnya menganggap Bumi berjari-jari empat pertiga dari jari-jari sebenarnya, sehingga 3.57 diganti dengan 4.12. Garis pandang penuh dari antena pada h1 ke pesawat pada h2 adalah jumlah kedua jarak cakrawala:

```
d (km) = 4.12 x ( sqrt(h1) + sqrt(h2) )   with h1, h2 in metres
```

Antena di atap 20 m, pesawat pada 11 000 m: 4.12 x (4.47 + 104.9) = 451 km. Antena yang sama, pesawat pada 1 000 m: 149 km. Pesawat di landasan pacu berjarak 30 km: 4.12 x (4.47 + 2) = 27 km, jadi tidak terdengar.



Buat grafik d terhadap h2 untuk ketinggian antenamu sendiri. Kurvanya curam di awal lalu mendatar, dan kurva itu menjelaskan bentuk cakupan setiap penerima: 400 km lebih untuk lalu lintas yang sedang jelajah, beberapa puluh kilometer untuk pesawat yang sedang mendekat untuk mendarat, dan tidak ada apa-apa di darat kecuali di bandara sebelah. Kurva itu menjelaskan mengapa ketinggian adalah sifat terpenting sebuah penerima, dan mengapa bukit, gedung, atau sayap pesawat itu sendiri saat berbelok menjauh bisa langsung memutus sebuah jejak.

Batas kedua adalah energi. Transponder memancarkan beberapa ratus watt, kurang lebih merata ke semua arah horizontal. Pada jarak d, daya itu tersebar di permukaan bola seluas 4 pi d^2, sehingga daya yang ditangkap oleh antena dengan luas efektif tetap berkurang sebanding dengan 1 / d^2: hukum kuadrat terbalik, yang sebaiknya kamu turunkan dari luas bola, bukan dihafalkan. Dua kali lebih jauh, seperempat dayanya; sepuluh kali, seperseratusnya. Para insinyur menyatakan redaman dalam desibel, dengan 10 dB berarti faktor sepuluh dalam daya dan 3 dB berarti faktor dua, karena desibel mengubah perkalian yang melintasi banyak orde besaran menjadi penjumlahan. Redaman lintasan ruang bebas antara dua antena sederhana adalah:

```
path loss (dB) = 20 log10( d in km ) + 20 log10( f in MHz ) + 32.44
```

Pada 400 km dan 1090 MHz: 52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 dB. Pemancar 250 W setara dengan +54 dBm; daya yang diterima 54 - 145 = -91 dBm, sekitar 8 x 10^-13 W.

Angka itu patut direnungkan: penerima di atap mendeteksi sinyal yang 10^14.5 kali lebih lemah daripada sinyal yang meninggalkan pesawat, sepersejuta dari sepersejuta watt. Penerima hobi yang bagus bisa mendekode sampai sekitar -100 dBm, jadi masih ada cadangan 9 dB pada 400 km. Dengan kata lain, batas energi dan cakrawala geometris untuk pesawat penumpang yang sedang jelajah jatuh di tempat yang sama, dan itu memang disengaja: daya transponder dan standar penerima ditetapkan agar pesawat terdengar sampai cakrawalanya dan tidak jauh lebih dari itu, sehingga saluran tidak dibanjiri lalu lintas dari negara tetangga.

Dua penyempurnaan. Efek Doppler: pesawat yang mendekat dengan 250 m/s menggeser frekuensi yang diterima sebesar f v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz, kurang dari sepersejuta, yang tidak pernah disadari oleh penerima; bandingkan dengan bunyi pesawat yang sama, di mana v / c adalah 250 / 343 dan nadanya turun hampir satu oktaf saat pesawat lewat. Dan waktu tempuh: 400 km dengan kecepatan c butuh 1.33 ms, jadi posisi yang disiarkan sudah berumur 1.33 ms saat tiba, dan selama itu pesawat sudah bergerak 33 cm; tidak berarti untuk peta, tetapi menentukan untuk multilaterasi, yang justru bergantung pada mikrodetik-mikrodetik ini.

PELAJARAN 5

Antena dan penerima: dari gelombang 27 sentimeter menjadi titik di peta

Antena adalah konduktor tempat gelombang elektromagnetik yang lewat menginduksi arus bolak-balik, dan perangkat yang sama, jika dialiri arus, meluncurkan gelombang; antena penerima dan antena pemancar adalah benda yang sama yang bekerja ke arah sebaliknya. Arus induksi paling besar saat terjadi resonansi, yaitu ketika panjang konduktor membuat distribusi arus di sepanjangnya cocok dengan osilasi gelombang, seperti senar dengan panjang yang tepat beresonansi dengan nada tertentu. Resonansi dasar konduktor lurus terjadi pada setengah panjang gelombang, 13.75 cm pada 1090 MHz, dengan arus terbesar di tengah dan nol di ujung-ujungnya. Antena ADS-B yang praktis, di pesawat maupun di sebagian besar penerima, adalah monopole seperempat gelombang: elemen vertikal 6.9 cm di atas bidang pentanahan (ground plane) konduktif, yang mencerminkannya sehingga elemen dan bayangannya bersama-sama membentuk dipol setengah gelombang. Di pesawat, badan pesawat menjadi bidang pentanahannya; antena 1090 MHz yang dibeli menyembunyikan geometri yang sama di dalam tabungnya, ditumpuk beberapa kali. Antena buatan sendiri akan meleset nadanya karena kesalahan beberapa milimeter dan hanya mendengar sebagian kecil langit, itulah sebabnya penerima dalam proyek ini memakai antena yang sudah disetel di pabrik.

Monopole vertikal paling peka ke arah cakrawala dan sama sekali tidak peka sepanjang sumbunya sendiri; dalam tiga dimensi, kepekaannya berbentuk donat dengan antena menembus lubangnya. Jadi penerimamu akan mendengar dengan sempurna pesawat yang berjarak 300 km dan kehilangan pesawat yang lewat tepat di atas kepala selama beberapa detik, dan kamu bisa melihat hal ini terjadi. Antena kolinear, yaitu beberapa elemen resonan yang ditumpuk, membuat donat itu lebih pipih dan

meningkatkan kepekaan di cakrawala dengan mengorbankan lubang di atas kepala: inilah penguatan antena (gain), diukur dalam dBi, dan gain berasal dari pembagian ulang kepekaan, tidak pernah dari menciptakannya. Dan dari pelajaran 1, antena harus vertikal, karena gelombangnya terpolarisasi vertikal.

Di antara antena dan sebuah titik di peta ada empat tahap. Filter lolos pita meloloskan 1090 MHz dan menolak sinyal ponsel yang jauh lebih kuat beberapa ratus megahertz di sebelahnya, yang kalau tidak ditolak akan menjenuhkan semua yang ada sesudahnya. Penguat derau rendah (LNA) di antena memperkuat sinyal seribu kali sebelum masuk kabel, yang pada 1090 MHz kehilangan sekitar 3 dB, setengah sinyalnya, setiap sepuluh meter; jika kamu memperkuat setelah kabel, derau kabel ikut diperkuat. Radio berbasis perangkat lunak (SDR), perangkat USB seharga 20 euro yang aslinya dijual sebagai penerima televisi, menurunkan frekuensi sinyal dan mencuplik dua juta kali per detik menjadi aliran angka. Dari sini semuanya adalah pemrograman: perangkat lunak gratis memindai cuplikan untuk mencari preambul, mengukur paruh mana dari setiap slot mikrodetik yang membawa lebih banyak energi, menyusun 112 bit, menghitung CRC, dan jika lolos, mendekode bidang-bidangnya. Lalu sebuah pelacak memasangkan bingkai posisi genap dan ganjil, menggabungkan posisi, kecepatan, dan identitas berdasarkan alamat ICAO, dan menyimpan keadaan setiap pesawat sampai pesannya berhenti datang, biasanya karena pesawat itu sudah turun di bawah cakrawala.

Gambarlah rantai itu, dengan besaran di setiap tahap: nanovolt di antena, mikrovolt setelah penguat, dua juta cuplikan per detik keluar dari radio, beberapa ratus bingkai per detik keluar dari dekoder, satu catatan per pesawat keluar dari pelacak. Sebuah titik di peta adalah ujung akhir dari rantai yang setiap mata rantainya adalah gagasan dari kursus ini: resonansi, penyaringan, penguatan, pencuplikan, pencocokan pola, pendekodean, pemeriksaan kesalahan, penggabungan. Proyeknya adalah merakit rantai itu dan menguji kursus ini terhadap langit: ukur jangkauan maksimummu terhadap ketinggian dan bandingkan dengan rumus cakrawala; bandingkan antena di dalam ruangan, di jendela, dan di atap, dalam posisi vertikal dan horizontal; catat lalu lintas selama sehari dan temukan jam tersibuk serta ketinggian jelajah yang umum; dekode pesan mentah dan periksa CRC-nya dengan kodemu sendiri. Lalu ajukan pertanyaan-pertanyaan yang dimunculkan sistem ini tetapi tidak dijawabnya: pesan-pesan itu tidak ditandatangani secara digital, jadi apa yang mencegah seseorang menyiarkan pesawat hantu; pesawat bergantung pada satelit yang bisa diganggu, jadi apa yang dilihat pengatur lalu lintas udara ketika itu terjadi; dan data ini mengidentifikasi pesawat, yang bisa mengidentifikasi orang, jadi siapa yang boleh mengikuti siapa.

Tantangan

Kerjakan setiap soal di kertas lebih dulu. Tombol periksa menampilkan jawaban dan penalarannya.

1. **1. Berapa panjang gelombang sinyal 1090 MHz, dan berapa panjang antena seperempat gelombang untuknya?**

2. **2. Berapa kali lebih cepat pesan dibandingkan bunyi? Sebuah pesawat berjarak 30 km memancarkan keduanya bersamaan; sejauh apa ia sudah terbang saat bunyinya tiba?**

3. **3. Jam sebuah penerima salah 2 mikrodetik. Berapa kesalahan jarak yang ditimbulkannya, dan mengapa penerima satelit butuh empat satelit, bukan tiga?**

4. **4. Berapa banyak pesawat yang bisa diidentifikasi dengan alamat 24 bit? Berapa lama pesan 112 bit dengan 1 bit per mikrodetik berlangsung, dan berapa lama seluruh pancaran beserta preambulnya?**

5. **5. Dalam pesan 8D4840D6…, berapa format downlink dan capability-nya, dan apa alamat ICAO-nya?**

6. **6. Sebuah antena penerima berada di ketinggian 15 m. Berapa jarak cakrawala radio ke pesawat pada 9 000 m, dan ke pesawat pada 300 m?**

7. **7. Mengapa jarak yang dua kali lipat membuat daya yang diterima tinggal seperempat? Berapa redaman lintasan pada 200 km, dan bagaimana perbandingannya dengan 145 dB pada 400 km?**

8. **8. Tebak apa yang terjadi pada jangkauan jika antena diletakkan mendatar, dan jika penerima dipindahkan dari atap ke lantai dasar.**

BERIKUTNYA

Rakit sendiri

Semua yang ada di pelajaran-pelajaran ini bisa diperiksa dari jendela. Lokakarya praktik memberimu daftar belanja (sekitar 100 sampai 150 euro, atau Raspberry Pi yang sudah kamu punya), antena yang perlu dipilih dan tempat memasangnya, tiga perintah untuk memasang feeder Dataero, dan pengukuran-pengukuran yang menguji rumus-rumus itu terhadap pesawat sungguhan: cakrawala radio, hukum kuadrat terbalik, ritme harian. Ketika penerimamu mengirim data ke peta, setiap pesawat yang didengarnya ditampilkan untuk semua orang, dengan nama stasiunmu.

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

Jawaban

1. 1. Berapa panjang gelombang sinyal 1090 MHz, dan berapa panjang antena seperempat gelombang untuknya?
   lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. Elemen seperempat gelombang panjangnya 6.9 cm. Kecepatan cahaya yang tetap membuat frekuensi dan panjang gelombang berbanding terbalik.
2. 2. Berapa kali lebih cepat pesan dibandingkan bunyi? Sebuah pesawat berjarak 30 km memancarkan keduanya bersamaan; sejauh apa ia sudah terbang saat bunyinya tiba?
   3.00 x 10^8 / 343 = sekitar 875 000 kali. Pesan tiba dalam 100 mikrodetik, bunyi dalam 87 s, dan selama itu pesawat dengan kecepatan 250 m/s terbang 22 km.
3. 3. Jam sebuah penerima salah 2 mikrodetik. Berapa kesalahan jarak yang ditimbulkannya, dan mengapa penerima satelit butuh empat satelit, bukan tiga?
   2 x 10^-6 s x 3 x 10^8 m/s = 600 m. Tiga satelit hanya menentukan x, y, dan z jika jamnya sempurna; selisih jam adalah variabel tak diketahui keempat, jadi dibutuhkan satelit keempat.
4. 4. Berapa banyak pesawat yang bisa diidentifikasi dengan alamat 24 bit? Berapa lama pesan 112 bit dengan 1 bit per mikrodetik berlangsung, dan berapa lama seluruh pancaran beserta preambulnya?
   2^24 = 16 777 216. Datanya berlangsung 112 mikrodetik; dengan preambul 8 mikrodetik, 120 mikrodetik.
5. 5. Dalam pesan 8D4840D6..., berapa format downlink dan capability-nya, dan apa alamat ICAO-nya?
   8D = 1000 1101. Lima bit pertama 10001 = 17: DF 17, ADS-B dari transponder Mode S. Tiga bit berikutnya 101 = 5: CA 5. Alamat ICAO-nya 4840D6, yang dialokasikan untuk Belanda.
6. 6. Sebuah antena penerima berada di ketinggian 15 m. Berapa jarak cakrawala radio ke pesawat pada 9 000 m, dan ke pesawat pada 300 m?
   d = 4.12 x (sqrt(15) + sqrt(9000)) = 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km. Untuk 300 m: 4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km.
7. 7. Mengapa jarak yang dua kali lipat membuat daya yang diterima tinggal seperempat? Berapa redaman lintasan pada 200 km, dan bagaimana perbandingannya dengan 145 dB pada 400 km?
   Daya yang dipancarkan tersebar di permukaan bola seluas 4 pi d^2, yang empat kali lebih luas pada jarak dua kali lipat. Pada 200 km: 20 log10(200) + 20 log10(1090) + 32.44 = 46.0 + 60.7 + 32.4 = 139 dB, 6 dB (faktor empat) lebih kecil daripada pada 400 km.
8. 8. Tebak apa yang terjadi pada jangkauan jika antena diletakkan mendatar, dan jika penerima dipindahkan dari atap ke lantai dasar.
   Mendatar: polarisasi antena bersilangan dengan gelombang yang vertikal; arus induksi bergantung pada komponen medan di sepanjang konduktor, jadi antena hampir tidak mendengar apa-apa. Lantai dasar: suku cakrawala 4.12 sqrt(h1) mengecil dan gedung-gedung menghalangi garis pandang, jadi jangkauan turun tajam, terutama untuk pesawat yang terbang rendah.