USIA 12 SAMPAI 18 TAHUN - UNTUK GURU

Memecahkan kode langit: fisika dan informatika melalui satu sistem nyata

Lima pelajaran dan satu proyek. Setiap pelajaran mengambil satu bagian ADS-B dan mengembangkan fisika atau informatika di baliknya secara utuh: penurunan rumus yang dapat diikuti kelas, contoh soal dengan angka nyata, peragaan yang membuat gagasannya dapat diamati, dan titik-titik tempat intuisi siswa keliru. Siswa yang lebih muda (12 sampai 14 tahun) mengikuti gagasan dan hitungannya; siswa yang lebih tua (15 sampai 18 tahun) mengikuti penurunan rumusnya dan menjalankan proyek.

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

DAFTAR ISI

Sebelum memulai: mengapa satu sistem nyata layak untuk lima pelajaran

PELAJARAN 1 - FISIKA Gelombang dan spektrum elektromagnetik: media perjalanan pesan

PELAJARAN 2 - FISIKA DAN MATEMATIKA Waktu dan posisi: bagaimana pesawat tahu di mana ia berada, dan bagaimana jaringan menemukan pesawat yang tidak mau menyebutkannya

PELAJARAN 3 - INFORMATIKA Pesan digital: 112 bit, cara pengirimannya, dan cara kesalahan terdeteksi

PELAJARAN 4 - FISIKA Perambatan dan jangkauan: kelengkungan Bumi dan hukum kuadrat terbalik

PELAJARAN 5 - FISIKA DAN REKAYASA Antena dan penerima: dari gelombang 27 sentimeter menjadi titik di peta

PROYEK - DUA SAMPAI EMPAT MINGGU Merakit penerima dan menguji fisika terhadap langit

Jawaban tantangan di halaman siswa

BERIKUTNYA Proyek, langkah demi langkah

Sebelum memulai: mengapa satu sistem nyata layak untuk lima pelajaran

Sebagian besar fisika yang diajarkan antara usia 12 dan 18 tahun diajarkan terpisah-pisah: satu bab tentang gelombang di sini, satu bab tentang spektrum elektromagnetik di sana, satu topik tentang data digital di pelajaran informatika, sekilas tentang satelit di pelajaran geografi. ADS-B adalah satu sistem yang berfungsi, tempat semua bagian itu sekaligus memikul peran penting, dan hasilnya dapat diamati kelas dengan penerima yang harganya lebih murah daripada sebuah buku pelajaran. Pesawat menentukan posisinya dengan mengukur waktu sinyal radio dari satelit, yaitu trilaterasi dan kecepatan cahaya. Pesawat mengodekan hasilnya dalam 112 bit dengan cyclic redundancy check, yaitu pengodean biner dan deteksi kesalahan. Pesawat memancarkannya sebagai gelombang radio termodulasi posisi pulsa pada 1090 MHz, yaitu spektrum, frekuensi, dan panjang gelombang. Gelombang itu hanya mencapai penerima sepanjang garis lurus yang tidak terhalang lengkung Bumi, dan tiba melemah sebanding dengan kuadrat terbalik jaraknya, yaitu geometri dan energi. Antena yang disetel pada seperempat panjang gelombang mengubahnya menjadi arus, yaitu resonansi. Dan sebuah jaringan

penerima bahkan dapat menemukan pemancar yang diam dari selisih waktu tiba, yaitu masalah satelit yang dibalik. Setiap pelajaran di bawah ini mengambil salah satu hal tersebut dan mengembangkannya secara mandiri, dengan ADS-B sebagai contoh yang berjalan sepanjang kursus, bukan sekadar hiasan.

Kursus referensi di halaman utama menyajikan keseluruhan sistem dalam bentuk narasi, dan kelas sebaiknya membaca bab 3 dan 5 sebelum pelajaran 3 serta bab 6 sampai 8 sebelum pelajaran 4 dan 5; glosariumnya berguna sebagai lembar bagikan. Halaman ini menganggap Anda sudah membacanya dan berfokus pada fisika dan pengajarannya. Konvensi angka konsisten di seluruh halaman: c = 3.00 x 10^8 m/s, f = 1090 MHz, ketinggian dalam meter, jarak dalam kilometer, dan pesawat yang sedang jelajah dianggap berada pada 11 000 m (flight level 360) dengan kecepatan 250 m/s, kecuali contohnya menyebutkan lain.

Dua peringatan tentang intuisi. Siswa datang dengan keyakinan bahwa gelombang radio adalah sejenis bunyi dan bahwa "radar" atau "satelit" yang melihat pesawat. Keduanya keliru, keduanya dibahas secara eksplisit di pelajaran 1 dan 2, dan keduanya akan muncul lagi; kursus ini dirancang agar setiap pelajaran berikutnya memberi Anda alasan baru untuk meluruskannya. Selain itu, siswa yang nyaman dengan rumus sering kali tidak nyaman dengan besaran: kursus ini banyak bertanya "seberapa besar itu?" di setiap langkah, karena 300 m per mikrodetik, redaman lintasan 145 dB, dan 2^24 alamat adalah jenis angka yang membuat fisika terasa nyata.

PELAJARAN 1 - FISIKA

Gelombang dan spektrum elektromagnetik: media perjalanan pesan

Mulailah dari pengamatan yang menjadi dasar seluruh kursus: pesan radio pesawat dan berkas cahaya adalah fenomena fisika yang sama. Keduanya gelombang elektromagnetik, medan listrik dan medan magnet yang berosilasi dan merambat melalui ruang tanpa medium apa pun, dengan kecepatan c yang sama untuk setiap frekuensi di ruang hampa dan hampir sama di udara: 299 792 458 m/s, yang dapat dibulatkan kelas menjadi 3.00 x 10^8 m/s. Besaran yang membedakan radio dari cahaya tampak, dan cahaya tampak dari sinar-X, hanyalah frekuensi f osilasinya. Retina kita peka terhadap frekuensi antara sekitar 4 x 10^14 dan 8 x 10^14 Hz, yang kita lihat sebagai merah sampai ungu; ADS-B dipancarkan pada 1.09 x 10^9 Hz, kira-kira setengah juta kali lebih rendah. Tidak ada yang berbeda jenisnya pada gelombang itu; hanya mata kita yang selektif.

Turunkan persamaan gelombang bersama kelas, jangan sekadar menyebutkannya. Jika sebuah gelombang merambat dengan kecepatan c dan berosilasi f kali per detik, maka dalam satu detik ia telah maju sejauh c dan menghasilkan f siklus lengkap; jadi setiap siklus menempati panjang c / f. Panjang itu adalah panjang gelombang, lambda, sehingga c = f x lambda. Untuk ADS-B: lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. Pesan antara pesawat dan penerima punya puncak-puncak yang berjarak 27.5 cm. Minta kelas menempatkannya pada spektrum yang mereka gambar sendiri, pada sumbu logaritmik: siaran FM pada 100 MHz dan 3 m, ADS-B pada 1 090 MHz dan 27.5 cm, ponsel pada 1 800 MHz dan 17 cm, Wi-Fi dan oven microwave pada 2 450 MHz dan 12 cm, inframerah, cahaya tampak pada 5.6 x 10^14 Hz dan 540 nm, dan seterusnya sampai sinar-X. Latihan menempatkan gelombang pesawat di antara ponsel dan oven lebih berharga daripada tabel mana pun, karena latihan itu menunjukkan bahwa semuanya bertetangga.

Sekarang hadapi kerancuan dengan bunyi secara langsung, karena kerancuan ini universal dan karena perbandingannya mengajarkan kedua fenomena. Bunyi adalah gelombang tekanan longitudinal dalam suatu medium; kecepatannya adalah sifat medium, 343 m/s di udara pada 20 derajat, sekitar 1 500 m/s di air, dan nol di ruang hampa. Radio adalah gelombang elektromagnetik transversal yang sama sekali tidak membutuhkan medium, merambat dengan kecepatan c di ruang hampa dan sedikit sekali lebih lambat di udara. Beri angka pada selisihnya: 3.00 x 10^8 dibagi 343 sekitar 875 000. Pesawat berjarak 30 km yang memancarkan bunyi dan pesan pada saat yang sama mengantarkan pesannya dalam 100 mikrodetik dan bunyinya dalam 87 detik; saat bunyinya tiba, pesawat sudah terbang 22 km. Peragaannya adalah seutas tali di kelas dan senter di seberang lapangan: gelombang tali jelas membutuhkan tali dan merambat dengan kecepatan yang ditentukan tali, sedangkan kilatan senter mencapai ujung lapangan tanpa jeda yang dapat diukur siapa pun. Sebutkan secara eksplisit apa yang dimiliki tali bersama cahaya (gelombang, panjang gelombang, frekuensi, kecepatan tetap, dan karena itu hubungan terbalik antara f dan lambda) dan apa yang tidak (medium, kecepatan dalam orde meter per detik).

Akhiri dengan polarisasi, yang murah untuk diperagakan dan berguna di pelajaran 5. Medan listrik gelombang elektromagnetik berosilasi ke arah tertentu yang tegak lurus terhadap arah rambatnya. Antena transponder pesawat dipasang vertikal, jadi gelombang ADS-B terpolarisasi vertikal; antena penerima juga harus vertikal, dan jika dibuat horizontal hampir tidak mendengar apa-apa. Gelombang tali yang digoyang vertikal lolos melalui celah vertikal pada kotak kardus dan tertahan oleh celah horizontal; dua lembar film polarisasi (dari kacamata 3D murah) yang disilangkan di depan jendela menunjukkan hal yang sama untuk cahaya. Minta kelas menebak apa yang terjadi pada penerimaan jika antena penerima diletakkan mendatar. Mereka akan menguji tebakan itu dalam proyek.

Contoh soal untuk diberikan
Sistem ADS-B kedua, yang dipakai pesawat ringan di Amerika Serikat, memancar pada 978 MHz. Berapa panjang gelombangnya, dan berapa panjang antena seperempat gelombang untuknya? (0.307 m; 7.7 cm.) Siswa yang dapat mengerjakan ini sudah menguasai pelajaran 1.

PELAJARAN 2 - FISIKA DAN MATEMATIKA

Waktu dan posisi: bagaimana pesawat tahu di mana ia berada, dan bagaimana jaringan menemukan pesawat yang tidak mau menyebutkannya

Semua yang disiarkan pesawat tentang posisinya berasal dari navigasi satelit, dan navigasi satelit pada dasarnya adalah pengukuran waktu. Setiap satelit GNSS, yang mengorbit pada sekitar 20 200 km, membawa jam atom dan memancarkan sinyal yang menyebutkan posisinya sendiri dan saat tepat pemancarannya. Penerima mencatat saat sinyal tiba. Selisihnya, dikalikan c, adalah jarak ke satelit itu, dan satu jarak seperti itu menempatkan penerima pada bola berjari-jari tersebut yang berpusat di satelit. Biarkan kelas menurunkan jumlahnya: dua bola berpotongan membentuk lingkaran, tiga bola di dua titik, salah satunya jauh dari permukaan Bumi dan dapat dibuang. Jadi tiga satelit sudah cukup, asalkan penerima punya jam yang sempurna. Kenyataannya sama sekali tidak; osilator kuarsa bergeser jauh lebih banyak daripada nanodetik yang dibutuhkan. Solusinya, yang merupakan inti elegan dari pokok bahasan ini, adalah memperlakukan kesalahan jam penerima sebagai variabel tak diketahui keempat

dan memakai satelit keempat: empat persamaan dengan empat variabel (x, y, z, dan selisih jam), diselesaikan terus-menerus. Karena itu penerima GNSS membutuhkan empat satelit yang terlihat, dan sebagai hasil sampingan ia menjaga waktu sampai ketelitian puluhan nanodetik, itulah sebabnya penerima-penerima dalam jaringan pelajaran 5 memakai satelit yang sama dengan pesawat untuk jamnya.

Tuliskan besarannya di papan tulis dan terus kembali kepadanya. Cahaya menempuh 0.300 m dalam satu nanodetik dan 300 m dalam satu mikrodetik. Kesalahan waktu 1 mikrodetik adalah kesalahan jarak 300 m; ketelitian beberapa meter pada penerima modern setara dengan pengukuran waktu pada tingkat sepuluh nanodetik. Waktu tempuh dari satelit yang tepat di atas kepala adalah 20 200 km / 3.00 x 10^5 km/s = 0.0673 s, dan dari satelit di dekat cakrawala sekitar 0.086 s, jadi penerima mengukur selisih beberapa milidetik dengan ketelitian seperseratus juta dari selisih itu. Tanyakan kepada kelas apa yang akan terjadi jika jam sebuah satelit terlalu cepat satu mikrodetik; mereka seharusnya melihat bahwa setiap penerima yang memakainya akan bergeser sekitar 300 m sepanjang garis ke arah satelit itu, dan inilah sebabnya jam satelit dikoreksi dari darat beberapa kali sehari.

Pisahkan kedua ketinggian, karena pesan membawa keduanya dan siswa selalu menanyakannya. Solusi satelit memberikan tinggi geometris di atas elipsoid referensi Bumi. Meski begitu, pesawat melaporkan ketinggian barometrik: tekanan statis di luar badan pesawat yang dikonversi menjadi ketinggian melalui Atmosfer Standar Internasional (ISA), yang mengasumsikan 1013.25 hPa dan 15 derajat di permukaan laut serta penurunan 6.5 derajat per kilometer. Pada hari 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 ADS-B membawa ketinggian barometrik dalam langkah 25 kaki; pesan kecepatan membawa selisih antara tinggi barometrik dan geometris, sehingga penerima dapat memperoleh keduanya. Untuk kelompok yang lebih tua, hubungan ISA p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255 menjadi latihan spreadsheet yang baik: balikkan untuk mencari h dari p dan periksa bahwa 11 000 m sesuai dengan sekitar 227 hPa, seperlima tekanan di permukaan laut.

Sekarang balik masalahnya. Sebagian pesawat memancar pada 1090 MHz tanpa posisi satelit: transponder lama yang menjawab radar hanya dengan identitas dan ketinggian, atau pesawat yang GNSS-nya diganggu (jamming). Sebuah jaringan penerima tetap dapat menemukan posisinya. Misalkan empat penerima dengan jam yang tersinkronisasi mencatat waktu tiba dari pancaran yang sama. Pemancarnya tidak diketahui, penerimanya diketahui: ini adalah masalah GNSS dengan peran yang diketahui dan yang tidak diketahui ditukar. Pesan yang tiba di penerima A satu mikrodetik lebih dulu daripada di penerima B dikirim dari titik yang 300 m lebih dekat ke A daripada ke B, dan tempat kedudukan titik-titik seperti itu adalah hiperboloid dengan A dan B sebagai titik fokus. Tiga pasangan independen dari empat penerima menghasilkan tiga hiperboloid, yang perpotongannya adalah posisi pesawat. Inilah multilaterasi, dan ia membutuhkan jam-jam penerima yang selaras sampai sekitar 100 ns, yang diperoleh dari satelit. Untuk kelas, sederhanakan menjadi dua dimensi dengan latihan di halaman sekolah: tiga siswa dengan stopwatch di titik-titik yang sudah diukur, siswa keempat bersembunyi di suatu tempat dan bertepuk tangan, ketiganya mencatat jeda waktu yang sudah dikoreksi dengan waktu reaksi, lalu kelas menggambar hiperbolanya (atau, lebih sederhana, memakai posisi coba-

coba pada gambar berskala) untuk menemukan si penepuk tangan, dengan 343 m/s. Lalu tanyakan seberapa teliti pengukuran waktunya agar hal yang sama dapat dilakukan dengan radio sejauh 200 km, dan biarkan mereka merasakan jurang antara stopwatch dan jam atom.

Contoh soal untuk diberikan
Dua penerima yang berjarak 60 km mencatat sebuah pesan dengan selisih 50 mikrodetik. Berapa lebih dekat pesawat itu ke penerima pertama? (15 km.) Jika jam-jam itu saling berselisih 1 mikrodetik, berapa kesalahan yang ditimbulkannya pada jawaban? (300 m.) Siswa yang dapat menjelaskan mengapa jawaban kedua tidak bergantung pada jarak sudah memahami apa yang dituntut multilaterasi.

PELAJARAN 3 - INFORMATIKA

Pesan digital: 112 bit, cara pengirimannya, dan cara kesalahan terdeteksi

Transponder pesawat mengirim data ADS-B-nya sebagai Mode S extended squitter: preambul 8 mikrodetik diikuti 112 bit data dengan kecepatan tepat satu bit per mikrodetik. Mulailah pelajaran dengan preambul, karena preambul menjawab pertanyaan yang belum terpikir oleh siswa: bagaimana penerima tahu bahwa sebuah pesan sudah dimulai, padahal salurannya penuh derau dan pesawat lain? Preambul adalah pola tetap berupa empat pulsa pada 0, 1, 3.5, dan 4.5 mikrodetik. Dekoder terus-menerus mencari pola itu; ketika menemukannya, ia tahu bahwa sebuah pesan menyusul dan tepat kapan setiap slot bit dimulai. Setiap protokol digital yang pernah ditemui siswa, dari Wi-Fi sampai kode QR, punya padanannya, dan ini saat yang tepat untuk menyampaikannya.

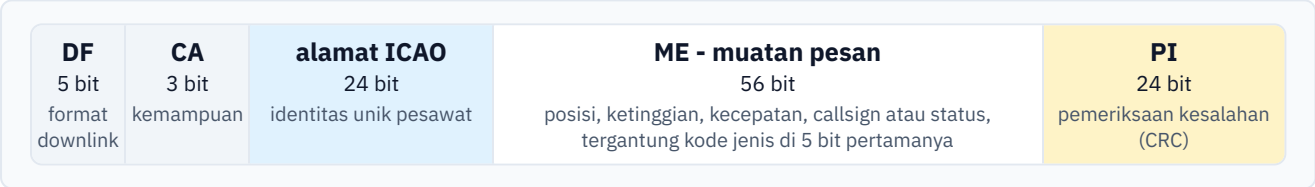
Lalu modulasinya. Radio hanya bisa menyala atau mati; bagaimana mengirim 1 atau 0? ADS-B memakai modulasi posisi pulsa: setiap slot bit satu mikrodetik dibagi menjadi dua bagian, dan pulsa di paruh pertama yang diikuti hening berarti 1, hening yang diikuti pulsa berarti 0. Gambarlah beberapa bit di papan sebagai pulsa dan minta kelas membacanya. Lalu tanyakan mengapa cara ini lebih baik daripada skema yang tampak jelas, yaitu "ada pulsa berarti 1, tidak ada pulsa berarti 0". Dua alasan akan muncul dengan sedikit pancingan. Selalu ada tepat satu pulsa per bit, jadi penerima dapat menjaga patokan waktunya bahkan pada deretan nol, dan ia dapat menentukan setiap bit dengan bertanya paruh mana yang lebih kuat, bukan apakah pulsa melewati suatu ambang mutlak, sehingga pendekodean tidak peka terhadap seberapa kuat sinyal yang kebetulan datang. Deretan nol yang panjang dalam skema sederhana tidak dapat dibedakan dari hening; dalam PPM, deretan itu berupa ketukan teratur pulsa-pulsa di paruh kedua.

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.

Sekarang susunan ke-112 bit, yang sebaiknya dapat dituliskan kembali oleh kelas dari ingatan pada akhir pelajaran. Bit 1 sampai 5 adalah format downlink, 17 untuk ADS-B dari transponder. Bit 6 sampai 8 adalah kode kemampuan (capability). Bit 9 sampai 32 adalah alamat ICAO 24 bit, identitas permanen pesawat. Bit 33 sampai 88 adalah bidang pesan 56 bit, yang lima bit pertamanya, kode jenis (type code), menyatakan isi 51 bit sisanya: pesan identifikasi (kode jenis 1 sampai 4) membawa callsign delapan karakter sebagai delapan karakter 6 bit; posisi di udara (9 sampai 18) membawa 12 bit ketinggian barometrik, penanda apakah ini bingkai genap atau ganjil, dan masing-masing 17 bit lintang dan bujur yang dikodekan; pesan kecepatan (19) membawa komponen kecepatan darat timur-barat dan utara-selatan, laju vertikal, dan selisih tinggi barometrik-geometris. Bit 89 sampai 112 adalah paritas 24 bit. Berikan hitungannya: 24 bit alamat memberi 2^24 = 16 777 216 pesawat; delapan karakter 6 bit memungkinkan masing-masing 64 simbol, cukup untuk huruf, angka, dan spasi; 12 bit ketinggian dalam langkah 25 kaki mencakup 102 400 kaki; dan 17 bit lintang, jika dipakai secara sederhana untuk 180 derajat, hanya memberi resolusi 1.4 km, yang memunculkan pertanyaan yang dijawab oleh compact position reporting (CPR). Jelaskan CPR dalam satu paragraf: ke-17 bit memberikan posisi di dalam sebuah zona sampai beberapa meter, tetapi tidak menyebutkan zonanya; pesawat bergantian antara dua kisi zona, genap dan ganjil, dan penerima yang punya masing-masing satu dapat menentukan zonanya tanpa keraguan, lalu melacak dari pesan tunggal. Ini contoh yang apik tentang memperoleh ketelitian lebih tinggi dari bit yang sama dengan memanfaatkan waktu.



Berikan kepada kelas sebuah pesan sungguhan dan biarkan mereka membedahnya. String heksadesimal 8D4840D6202CC371C32CE0576098 terdiri atas 28 digit heksadesimal, 112 bit. Mengonversi dua digit pertama, 8D, ke biner menghasilkan 10001 101: DF = 17, CA = 5. Enam digit berikutnya, 4840D6, adalah alamat ICAO, yang menurut tabel alokasi diberikan kepada Belanda. Digit-digit berikutnya, 20 ..., diawali dengan 00100, kode jenis 4, pesan identifikasi, dan mendekode karakter-karakter 6 bit yang mengikutinya menghasilkan callsign KLM1023. Enam digit terakhir, 576098, adalah paritas. Kelas dengan spreadsheet atau beberapa baris Python dapat melakukan seluruh pendekodean dalam satu pelajaran, dan kemampuan mengambil sebaris heksadesimal lalu berkata "itu pesawat KLM yang mengumumkan nomor penerbangannya" adalah hasil yang hendak dicapai.

```
8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098
```

8D: format downlink 17, capability 5. 4840D6: alamat ICAO, dialokasikan untuk Belanda. 20...: kode jenis 4, identifikasi, callsign KLM1023. 576098: paritas 24 bit.

Akhiri dengan paritas, karena itulah gagasan informatika yang paling layak dikembangkan. Di atas bandara yang sibuk, pesan-pesan dari pesawat yang berbeda terus-menerus saling tumpang tindih di penerima, dan pulsa juga hilang tertutup derau; dekoder pasti akan menyusun bit yang salah. Bidang 24 bit di bagian akhir adalah cyclic redundancy check (CRC): ke-88 bit pesan diperlakukan sebagai bilangan biner panjang dan dibagi, dalam aritmetika khusus yang pengurangannya berupa exclusive-or (XOR), oleh pembangkit tetap sepanjang 25 bit; sisanya adalah CRC. Penerima mengulangi pembagian itu pada

bit yang didekodenya lalu membandingkannya. Satu bit yang rusak, dua bit, atau rentetan kesalahan sepanjang sampai 24 bit akan mengubah sisanya, sehingga pesan yang rusak ditolak. Peragakan gagasannya dalam skala kecil dengan CRC 4 bit pada pesan 8 bit yang dikerjakan dengan tangan, atau dengan analogi yang lebih sederhana berupa digit pemeriksa pada barcode; lalu minta kelompok yang lebih tua menerapkan CRC-24 yang sebenarnya dalam beberapa baris kode dan memeriksa bahwa paritas contoh pesan itu keluar dengan benar, dan bahwa membalik satu bit membuatnya gagal. Inilah deteksi kesalahan seperti yang dilakukan setiap sistem modern, ditemui dalam konteks di mana kesalahan yang terlewat bisa menampilkan pesawat hantu di layar pengatur lalu lintas udara.

Contoh soal untuk diberikan
Berapa lama satu pancaran lengkap berlangsung, dan jika sebuah transponder mengirim 4.5 extended squitter per detik, berapa bagian waktu yang dipakainya untuk memancarkan ADS-B? (120 mikrodetik; 540 mikrodetik per detik, 0.054 persen.) Secara teori, berapa banyak pesawat yang dapat berbagi saluran sebelum saluran itu sibuk terus-menerus, dengan mengabaikan semua pancaran lain di saluran itu? (Sekitar 1 850, itulah sebabnya kepadatan di wilayah udara tersibuk merupakan persoalan rekayasa yang nyata.)

PELAJARAN 4 - FISIKA

Perambatan dan jangkauan: kelengkungan Bumi dan hukum kuadrat terbalik

Seberapa jauh penerima dapat mendengar pesawat? Pertanyaan ini punya dua jawaban yang independen, geometris dan energetik, dan tujuan pelajaran ini adalah menurunkan keduanya dan menemukan bahwa para perancang mengaturnya agar sama. Mulailah dengan geometri. Pada 1090 MHz, radio tidak mengalami difraksi yang berarti di sekitar Bumi; ia berperilaku seperti cahaya dan merambat dalam garis lurus. Karena itu penerima hanya dapat mendengar pesawat di atas cakrawalanya, yaitu pesawat yang garis lurusnya ke antena tidak menembus tanah. Turunkan jarak cakrawala bersama kelas. Antena pada ketinggian h di atas bola berjari-jari R melihat cakrawala di titik tempat garis pandangnya menyinggung bola. Garis singgung, jari-jari ke titik singgung, dan jari-jari ke antena membentuk sudut siku-siku di titik singgung, jadi menurut Pythagoras d^2 + R^2 = (R + h)^2, yang menghasilkan d^2 = 2Rh + h^2. Karena h sangat kecil dibandingkan R, d = sqrt(2Rh). Dengan R = 6 371 km dan h dalam meter, d dalam kilometer = sqrt(2 x 6371 x h / 1000) = 3.57 sqrt(h). Kerapatan atmosfer, dan karena itu indeks biasnya, menurun seiring ketinggian, yang sedikit membelokkan sinar radio ke bawah; koreksi standarnya menganggap Bumi seolah-olah 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: 4.12 x (4.47 + 31.6) = 149 km. Pesawat di landasan pacu berjarak 30 km: 4.12 x (4.47 + 2) = 27 km, jadi tidak terdengar.



Minta kelas membuat grafik d terhadap h2 untuk ketinggian antena sekolah mereka sendiri; kurvanya, curam di awal lalu mendatar, menjelaskan bentuk cakupan setiap penerima: lingkaran 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 juga menjelaskan mengapa ketinggian lebih penting daripada sifat lain mana pun dari sebuah penerima, dan mengapa bukit di antara Anda dan bandara, atau sayap pesawat itu sendiri saat berbelok menjauh, langsung memutus sebuah jejak. Peragaan di halaman sekolah dari kursus sekolah dasar, yaitu melihat lebih jauh dari atas bangku daripada sambil berjongkok, tidak terlalu kekanak-kanakan untuk kelompok usia ini jika Anda melanjutkannya dengan penurunan rumus; intinya, sekarang mereka tahu alasannya.

Sekarang energi. Transponder memancarkan daya puncak beberapa ratus watt, kurang lebih merata ke semua arah horizontal. Pada jarak d, daya itu sudah 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 diturunkan kelas dari luas bola, bukan dihafalkan. Dua kali jaraknya, seperempat dayanya; sepuluh kali, seperseratusnya. Para insinyur radio menyatakan redaman antara pemancar isotropik dan penerima isotropik dalam desibel, dan rumus standarnya, yang dapat diterima begitu saja oleh kelompok yang lebih tua atau diturunkan dari luas efektif antena, lambda^2 / 4 pi, adalah:

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

Pada 400 km dan 1090 MHz: 20 x 2.60 + 20 x 3.04 + 32.44 = 52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 dB. Pemancar 250 W setara dengan +54 dBm; daya yang diterima adalah 54 - 145 = -91 dBm, sekitar 8 x 10^-13 W, atau sepersejuta dari sepersejuta watt.

Luangkan beberapa menit untuk desibel jika kelas belum mengenalnya, karena desibel mengubah perkalian yang melintasi empat belas orde besaran menjadi penjumlahan, dan karena angkanya sendiri bersifat mendidik: penerima di atap mendeteksi sinyal yang 10^14.5 kali lebih lemah daripada sinyal yang meninggalkan pesawat. Penerima hobi yang bagus dapat mendekode sampai sekitar -100 dBm, jadi masih ada cadangan sekitar 9 dB pada 400 km, artinya batas energi dan cakrawala geometris untuk pesawat penumpang yang sedang jelajah jatuh di tempat yang sama. Itu bukan kebetulan; daya transponder dan standar penerima ditetapkan agar pesawat terdengar sampai cakrawala dan tidak jauh lebih dari itu, sehingga saluran tidak dibanjiri pancaran dari negara tetangga.

Dua penyempurnaan untuk kelompok yang lebih tua. Pertama, efek Doppler: pesawat yang mendekat dengan 250 m/s menggeser frekuensi yang diterima sebesar f x v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz, kurang dari sepersejuta frekuensi pembawa, yang tidak pernah disadari oleh penerima; bandingkan dengan pergeseran Doppler yang terdengar pada bunyi pesawat, di mana v / c adalah 250 / 343 dan nadanya berubah hampir satu oktaf saat pesawat lewat. Kedua, waktu tempuh sinyal: 400 km dengan kecepatan c butuh 1.33 ms, jadi posisi dalam pesan sudah berumur 1.33 ms, dan selama itu pesawat sudah bergerak 33 cm; tidak berarti untuk peta, tetapi menentukan untuk multilaterasi di pelajaran 2, yang justru bergantung pada mikrodetik-mikrodetik ini.

Contoh soal untuk diberikan
Sebuah penerima di tiang setinggi 10 m mendengar pesawat yang sedang jelajah pada 11 000 m, tetapi tidak mendengar pesawat ringan pada 600 m yang berjarak 130 km. Apakah pesawat ringan itu berada di bawah cakrawala? (Cakrawala: 4.12 x (3.16 + 24.5) = 114 km, jadi ya.) Setinggi apa penerima itu harus dipasang agar dapat mendengarnya? (Diperlukan 4.12 x (sqrt(h1) + 24.5) = 130, jadi sqrt(h1) = 7.05, h1 = 50 m.)

PELAJARAN 5 - FISIKA DAN REKAYASA

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

Antena adalah konduktor tempat gelombang elektromagnetik yang lewat menginduksi arus bolak-balik; antena penerima dan antena pemancar adalah perangkat yang sama yang bekerja ke arah berlawanan, suatu resiprositas yang perlu disampaikan secara eksplisit kepada kelas. Arus induksi paling besar ketika konduktor beresonansi: ketika panjangnya membuat distribusi arus di sepanjangnya cocok dengan osilasi gelombang, persis seperti senar dengan panjang yang tepat beresonansi dengan nada tertentu atau ayunan dengan irama dorongan 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 yang berdiri di atas bidang pentanahan (ground plane) konduktif, yang mencerminkannya secara listrik 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 untuk memusatkan kepekaannya ke arah cakrawala. Model yang dibuat di kelas dari batang 6.9 cm di atas tutup kaleng menunjukkan geometri dan panjangnya, diukur dengan penggaris terhadap gelombang 27.5 cm; namun penerima dalam proyek memakai antena yang sudah disetel di pabrik, karena kesalahan beberapa milimeter membuat antena buatan sendiri meleset nadanya dan hanya mendengar sebagian kecil langit.

Kembangkan pola radiasinya, karena pola itu meramalkan sesuatu yang dapat diamati kelas. Monopole vertikal memancar dan menerima paling kuat ke arah cakrawala dan sama sekali tidak sepanjang sumbunya sendiri; kepekaannya, jika digambar dalam tiga dimensi, berbentuk donat dengan antena menembus lubangnya. Jadi penerima biasanya mendengar dengan sempurna pesawat yang berjarak 300 km dan kehilangan pesawat yang lewat tepat di atas kepala selama beberapa detik, dan kelas dapat melihat hal ini terjadi pada penerima mereka sendiri. Antena kolinear, yaitu beberapa elemen resonan

yang ditumpuk, membuat donat itu lebih pipih, meningkatkan kepekaan di cakrawala tempat pesawat-pesawat yang jauh berada, dengan mengorbankan lubang di atas kepala: inilah penguatan antena (gain), dinyatakan dalam dBi, dan gain berasal dari pembagian ulang kepekaan, tidak pernah dari menciptakannya. Polarisasi, dari pelajaran 1, kini punya konsekuensi praktis yang akan diuji dalam proyek: antena harus vertikal.

Di antara antena dan komputer ada tiga tahap, masing-masing satu pelajaran kecil. Filter lolos pita meloloskan 1090 MHz dan menolak pancaran ponsel yang jauh lebih kuat beberapa ratus megahertz di sebelahnya, yang kalau tidak ditolak akan menjenuhkan penguat. Penguat derau rendah (LNA), yang dipasang di antena dan bukan di penerima, memperkuat sinyal seribu kali sebelum masuk ke kabel; urutannya penting, karena kabel koaksial pada 1090 MHz kehilangan kira-kira setengah sinyalnya, 3 dB, setiap sepuluh meter, dan memperkuat setelah redaman itu berarti ikut memperkuat derau kabel bersama sinyalnya. Lalu radio berbasis perangkat lunak (SDR): perangkat USB seharga 20 euro yang aslinya dibuat sebagai penerima televisi, yang menurunkan sinyal ke baseband dan mencupliknya dua juta kali per detik menjadi aliran angka. Sejak titik itu, masalah radio menjadi masalah pemrograman. Perangkat lunak gratis memindai aliran cuplikan untuk mencari pola 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 identifikasi berdasarkan alamat ICAO, dan menyimpan keadaan setiap pesawat sampai pesannya berhenti datang.

Berikan rantai itu kepada kelas sebagai diagram yang mereka gambar sendiri, dengan besaran di setiap tahap: nanovolt arus bolak-balik di antena; mikrovolt setelah penguat; dua juta angka 8 bit per detik keluar dari SDR; bingkai 112 bit keluar dari dekoder, mungkin beberapa ratus per detik; satu catatan per pesawat keluar dari pelacak. Hal yang perlu ditegaskan adalah bahwa sebuah titik di peta merupakan ujung akhir dari rantai yang setiap mata rantainya adalah gagasan yang kini mereka pahami: resonansi, penyaringan, penguatan, pencuplikan, pencocokan pola, pendekodean, pemeriksaan kesalahan, penggabungan.

Contoh soal untuk diberikan
Sebuah kabel kehilangan 3 dB per 10 m pada 1090 MHz. Maka kabel sepanjang 20 m kehilangan berapa bagian sinyal? (6 dB, tiga perempat.) Jika batas penerima adalah -100 dBm dan sinyal di antena dari pesawat pada 400 km adalah -91 dBm, apakah sinyal itu dapat melewati kabel tanpa penguat? (Nyaris: -97 dBm. Sedikit saja redaman tambahan, hujan pada konektor atau kabel yang lebih panjang, dan pesawat di cakrawala menghilang. Inilah sebabnya penguat dipasang di antena.)

PROYEK - DUA SAMPAI EMPAT MINGGU

Merakit penerima dan menguji fisika terhadap langit

Proyek ini mengubah kelima pelajaran menjadi pengukuran. Peralatannya adalah dongle USB radio berbasis perangkat lunak (sekitar 25 euro), antena 1090 MHz yang sudah disetel di pabrik (50 sampai 70 euro), beberapa meter kabel koaksial, dan laptop atau Raspberry Pi yang menjalankan salah satu dekoder gratis (dump1090 dan turunannya adalah standarnya). Pemasangan memakan waktu satu sore, dan dalam beberapa menit perangkat lunaknya menampilkan tabel pesawat dengan alamat ICAO, callsign, posisi, ketinggian, dan kecepatannya, serta sebuah peta. Seluruh proyek hanya menerima; tidak

ada yang memancar, dan kelas perlu memahami bahwa memancar pada frekuensi penerbangan itu ilegal sekaligus berbahaya. Akses ke atap memerlukan izin sekolah seperti biasa; jendela di lantai atas yang menghadap jalur lalu lintas utama sudah merupakan awal yang sangat baik. Halaman Menjadi feeder di situs ini memandu pemasangan yang sama langkah demi langkah dan memungkinkan penerima sekolah mengirim data ke peta langsung.

Penyelidikan pertama adalah cakrawala radio. Untuk setiap pesawat, dekoder melaporkan jarak dan ketinggian saat pesawat itu terakhir terdengar. Selama sehari, kumpulkan jangkauan maksimum saat pesawat di beberapa rentang ketinggian diterima, lalu buat grafik jangkauan terhadap ketinggian. Siswa punya rumus dari pelajaran 4 dan ketinggian antenanya; mereka sebaiknya meramalkan kurvanya sebelum melihat datanya, lalu membandingkannya. Kecocokannya biasanya baik untuk pesawat yang tinggi dan kurang baik untuk yang rendah, dan diskusi tentang penyebabnya (gedung, medan, lubang di atas antena, bayangan dari pesawat itu sendiri) adalah jenis pertemuan antara teori dan pengukuran yang tidak dapat ditawarkan buku pelajaran. Peta pesawat terjauh yang terdengar di setiap arah, yang digambar oleh perangkat lunaknya, menampilkan medan seluruh wilayah sebagai bayangan dalam cakupan.

Penyelidikan kedua adalah antena. Bandingkan laju pesan dan jangkauan maksimum dengan antena di dalam ruangan, di jendela, dan di atap; vertikal dan diletakkan mendatar; berdiri di atas permukaan logam dan dijauhkan dari logam apa pun. Setiap perbandingan menguji klaim tertentu dari pelajaran 1 dan 5, dan setiap hasil sebaiknya diramalkan lebih dulu. Uji polarisasi adalah yang paling mencolok: jika diletakkan mendatar, antena kehilangan sebagian besar pesawatnya.

Penyelidikan ketiga adalah data. Catat lalu lintas selama sehari penuh dan ajukan pertanyaan kepadanya: jam tersibuk, sebaran ketinggian jelajah (siswa mengira sebarannya lebar dan ternyata menemukan sebagian besar pesawat penumpang antara 10 000 dan 12 000 m), laju menanjak pesawat yang lepas landas dari bandara terdekat, negara-negara yang pesawatnya paling sering lewat (dari alokasi alamat ICAO). Kelompok yang lebih tua dapat mendekode sendiri pesan mentah, dari heksadesimal yang dicatat perangkat lunak, dan memeriksa CRC dengan kode mereka sendiri. Kelas yang punya penerima kedua di sekolah mitra yang berjarak 30 kilometer atau lebih, keduanya dengan keluaran bercap waktu GNSS, dapat mencoba multilaterasi dua dimensi atas pesawat yang terdengar oleh keduanya dan membandingkannya dengan posisi yang disiarkan pesawat itu: hasil paling ambisius dari kursus ini, dan hasil yang nyata.

Akhiri dengan pertanyaan-pertanyaan yang dimunculkan sistem ini tetapi tidak dijawabnya. Pesan-pesannya tidak ditandatangani secara digital, jadi sebuah pemancar bisa menyiarkan pesawat hantu; apa yang melindungi sistem ini, dan berapa biaya versi yang ditandatangani? Pesawat bergantung pada satelit yang bisa diganggu; apa yang terjadi pada gambaran pengatur lalu lintas udara ketika itu terjadi? Data ini mengidentifikasi pesawat, dan pesawat dapat mengidentifikasi seseorang; siapa yang boleh mengikuti siapa? Kelas yang sudah merakit penerima layak mendapatkan pertanyaan-pertanyaan ini, dan pertanyaan itu cocok untuk esai akhir atau debat.

Jawaban tantangan di halaman siswa

Halaman siswa memuat delapan tantangan, satu atau dua per pelajaran, yang dapat dipakai sebagai pekerjaan rumah atau tes akhir kursus. Jawabannya, beserta penalaran yang harus ada dalam jawaban bernilai penuh:

1. Panjang gelombang pada 1090 MHz: lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. Elemen seperempat gelombang: 6.9 cm. Penalaran: c = f x lambda, dengan kecepatan cahaya yang tetap memaksa hubungan berbanding terbalik.
2. Cahaya lebih cepat daripada bunyi sebesar 3.00 x 10^8 / 343, sekitar 875 000 kali. Pada jarak 30 km, pesan butuh 100 mikrodetik dan bunyi 87 s; pesawat dengan kecepatan 250 m/s bergerak 22 km dalam waktu itu.
3. Kesalahan jam 2 mikrodetik menghasilkan kesalahan jarak 2 x 10^-6 x 3 x 10^8 = 600 m. Empat satelit diperlukan karena selisih jam penerima adalah variabel tak diketahui keempat di samping x, y, dan z.
4. 2^24 = 16 777 216 alamat. Pesan 112 bit dengan 1 bit per mikrodetik berlangsung 112 mikrodetik, 120 dengan preambul.
5. Dalam 8D4840D6..., 8D adalah 10001101: lima bit pertama 10001 adalah 17, jadi DF = 17, pesan ADS-B dari transponder Mode S; tiga bit berikutnya, 101, memberi CA = 5. 4840D6 adalah alamat ICAO.
6. Cakrawala radio dari antena 15 m ke pesawat pada 9 000 m: 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km. Untuk pesawat pada 300 m: 4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km.
7. Jarak yang dua kali lipat membuat daya yang diterima tinggal seperempat, karena daya pancar yang sama tersebar di permukaan bola yang luasnya empat kali lipat. Redaman lintasan pada 200 km dan 1090 MHz: 20 x 2.30 + 60.7 + 32.4 = 139 dB, 6 dB lebih kecil daripada pada 400 km, sesuai dengan faktor empat.
8. Antena yang diletakkan mendatar memiliki polarisasi bersilangan dengan gelombang yang terpolarisasi vertikal dan hanya menerima sangat sedikit; arus induksi bergantung pada komponen medan listrik di sepanjang konduktor. Penerima di lantai dasar kehilangan jangkauan karena jarak cakrawalanya, 4.12 x sqrt(h1), mengecil, dan karena gedung-gedung menghalangi garis pandang.

BERIKUTNYA

Proyek, langkah demi langkah

Proyek pelajaran 6 mengandaikan sudah ada penerima; lokakarya praktik merakitnya. Lokakarya ini ditulis untuk orang yang belum pernah memakai Raspberry Pi: daftar belanja beserta harganya, antena yang perlu dipilih, penempatannya dan redaman kabel, persiapan Pi, tiga perintah untuk memasang feeder Dataero, mengklaim stasiun, menyetel gain, dan lima pengukuran, satu per pelajaran, yang menguji fisika terhadap langit. Stasiun yang mengirim data ke Dataero memberi kelas sebuah dasbor, peta cakupan, dan riwayat satu tahun untuk diolah.

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