سنین 12 تا 18 سال - برای معلم

رمزگشایی آسمان: فیزیک و رایانه از راه یک سامانهٔ واقعی

پنج درس و یک پروژه. هر درس یک بخش از ADS-B را برمی‌دارد و فیزیک یا رایانهٔ پشت آن را به طور کامل بسط می‌دهد: اثبات‌ها هر جا که کلاس بتواند دنبالشان کند، مثال‌های حل‌شده با عددهای واقعی، نمایش‌هایی که ایده را قابل مشاهده می‌کنند، و نقطه‌هایی که شهود دانش‌آموزان در آن‌ها به خطا می‌رود. گروه کم‌سن‌تر (12 تا 14) ایده‌ها و محاسبات را دنبال می‌کند؛ گروه بزرگ‌تر (15 تا 18) اثبات‌ها را دنبال می‌کند و پروژه را اجرا می‌کند.

آموزش - https://radar.dataero.eu/fa/learning/ages-12-18 2026-11-21

فهرست مطالب

پیش از شروع: چرا یک سامانهٔ واقعی ارزش پنج درس را دارد
درس 1 - فیزیک موج‌ها و طیف الکترومغناطیسی: پیام بر چه چیزی سفر می‌کند
درس 2 - فیزیک و ریاضی زمان‌سنجی و موقعیت: هواپیما چگونه می‌داند کجاست، و یک شبکه چگونه هواپیمایی را پیدا می‌کند که جایش را نمی‌گوید
درس 3 - رایانه پیام دیجیتال: 112 بیت، چگونه فرستاده می‌شوند، و خطاها چگونه شناسایی می‌شوند
درس 4 - فیزیک انتشار و بُرد: انحنای زمین و قانون عکس مجذور
درس 5 - فیزیک و مهندسی آنتن‌ها و گیرنده‌ها: از یک موج 27 سانتی‌متری تا یک نقطه روی نقشه
پروژه - دو تا چهار هفته یک گیرنده بسازید و فیزیک را در برابر آسمان آزمایش کنید
پاسخ چالش‌های دانش‌آموز
گام بعدی پروژه، گام به گام

پیش از شروع: چرا یک سامانهٔ واقعی ارزش پنج درس را دارد

بیشتر فیزیکی که میان 12 تا 18 سالگی تدریس می‌شود تکه‌تکه تدریس می‌شود: یک واحد دربارهٔ موج‌ها اینجا، یکی دربارهٔ طیف الکترومغناطیسی آنجا، مبحثی دربارهٔ دادهٔ دیجیتال در درس رایانه، اشاره‌ای به ماهواره‌ها در جغرافیا. ADS-B یک سامانهٔ واحدِ در حال کار است که همهٔ این تکه‌ها در آن هم‌زمان بار اصلی را به دوش می‌کشند، و کلاس می‌تواند نتیجه را با گیرنده‌ای ارزان‌تر از یک کتاب درسی مشاهده کند. هواپیما موقعیتش را با زمان‌سنجی سیگنال‌های رادیویی ماهواره‌ها تعیین می‌کند، یعنی سه‌جانبه‌سازی و سرعت نور. نتیجه را در 112 بیت با یک بررسی افزونگی چرخه‌ای (CRC) کد می‌کند، یعنی کدگذاری دودویی و تشخیص خطا. آن را به شکل یک موج رادیویی با مدولاسیون موقعیت پالس در 1090 MHz می‌فرستد، یعنی طیف، بسامد و طول موج. موج فقط در امتداد خط راستی که از انحنای زمین بگذرد به گیرنده می‌رسد، و به نسبت عکس مجذور فاصله ضعیف‌تر می‌رسد، یعنی هندسه و انرژی. یک آنتن تنظیم‌شده به طول ربع موج آن را به جریان تبدیل می‌کند، یعنی تشدید. و شبکه‌ای از گیرنده‌ها می‌تواند حتی فرستنده‌ای ساکت را از اختلاف زمان‌های رسیدن پیدا کند، یعنی همان مسئلهٔ ماهواره که وارونه شده است. هر درس در ادامه یکی از این‌ها را برمی‌دارد و به خودیِ خود بسط می‌دهد، با ADS-B به‌عنوان مثال پیوسته، نه به‌عنوان تزیین.

دورهٔ مرجع در صفحهٔ اصلی کل سامانه را به شکل روایی ارائه می‌دهد، و کلاس باید فصل‌های 3 و 5 آن را پیش از درس 3 و فصل‌های 6 تا 8 را پیش از درس‌های 4 و 5 بخواند؛ واژه‌نامهٔ آن جزوهٔ مفیدی است. این صفحه فرض می‌کند که شما آن را خوانده‌اید و بر فیزیک و آموزش تمرکز می‌کند. قراردادهای عددی در سراسر آن یکسان‌اند: $c = 3.00 \times 10^8$ m/s، $f = 1090$

MHz، ارتفاع‌ها بر حسب متر، فاصله‌ها بر حسب کیلومتر، و هواپیما در حال کروز در 11 000 m (سطح پروازی 360) و با 250 m/s، مگر اینکه مثال چیز دیگری بگوید.

دو هشدار دربارهٔ شهود. دانش‌آموزان با این باور می‌آیند که امواج رادیویی نوعی صدا هستند و اینکه «رادار» یا «ماهواره‌ها» هواپیماها را می‌بینند. هر دو نادرست‌اند، هر دو در درس‌های 1 و 2 به‌صراحت بررسی می‌شوند، و هر دو دوباره پیدا خواهند شد؛ دوره طوری طراحی شده که هر درس بعدی دلیل تازه‌ای برای اصلاحشان به شما بدهد. و دانش‌آموزانی که با فرمول‌ها راحت‌اند اغلب با مقدارها راحت نیستند: دوره در هر گام بسیار بر پرسیدن «این چقدر بزرگ است؟» تکیه می‌کند، چون 300 m در هر میکروثانیه، 145 dB اتلاف مسیر و 2^24 نشانی از آن عددهایی‌اند که فیزیک را واقعی جلوه می‌دهند.

درس 1 - فیزیک

موج‌ها و طیف الکترومغناطیسی: پیام بر چه چیزی سفر می‌کند

از مشاهده‌ای شروع کنید که کل دوره بر آن استوار است: پیام رادیویی هواپیما و یک باریکهٔ نور یک پدیدهٔ فیزیکی‌اند. هر دو موج الکترومغناطیسی‌اند، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسیِ نوسان‌کننده‌ای که بدون هیچ محیط مادی در فضا منتشر می‌شوند، با سرعت c که در خلأ برای همهٔ بسامدها یکسان است و در هوا تقریباً همین‌طور: 299 792 458 m/s، که کلاس می‌تواند آن را 3.00 x 10^8 m/s در نظر بگیرد. کمیتی که رادیو را از نور مرئی، و نور مرئی را از پرتو ایکس، متمایز می‌کند فقط بسامد f نوسان است. شبکیهٔ چشم ما به بسامدهای میان حدود 4 10^14 x و 8 10^14 Hz x پاسخ می‌دهد که آن‌ها را از قرمز تا بنفش درک می‌کنیم؛ ADS-B با 1.09 10^9 Hz x فرستاده می‌شود، تقریباً نیم میلیون بار پایین‌تر. هیچ چیز در خود موج ماهیتاً متفاوت نیست؛ فقط چشم‌های ما گزینشی‌اند.

معادلهٔ موج را برای کلاس به دست آورید به جای اینکه آن را بیان کنید. اگر موجی با سرعت c حرکت کند و f بار در ثانیه نوسان کند، در یک ثانیه به اندازهٔ c پیش رفته و f چرخهٔ کامل ساخته است؛ پس هر چرخه طولی برابر c / f اشغال می‌کند. این طول همان طول موج، lambda، است و بنابراین c = f x lambda. برای ADS-B: lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. پیام میان هواپیما و گیرنده قله‌هایی با فاصلهٔ 27.5 cm دارد. از کلاس بخواهید آن را روی طیفی که خودشان روی یک محور لگاریتمی رسم می‌کنند قرار دهند: پخش FM در 100 MHz و ADS-B 3 m، در 1 090 MHz و 27.5 cm، تلفن همراه در 1 800 MHz و Wi-Fi 17 cm، و اجاق مایکروویو در 2 450 MHz و 12 cm، فروسرخ، نور مرئی در 5.6 10^14 Hz x و 540 nm، و به همین ترتیب تا پرتو ایکس. تمرینِ قرار دادن موج هواپیما میان یک تلفن و یک اجاق از هر جدولی ارزشمندتر است، چون این نکته را روشن می‌کند که این‌ها همسایه‌اند.

حالا مستقیماً با اشتباه گرفتن رادیو با صدا روبه‌رو شوید، چون این اشتباه همگانی است و چون این مقایسه هر دو پدیده را آموزش می‌دهد. صدا یک موج فشاری طولی در یک محیط مادی است؛ سرعتش ویژگی محیط است، 343 m/s در هوا در 20 درجه، حدود 1 500 m/s در آب، و صفر در خلأ. رادیو یک موج الکترومغناطیسی عرضی است که اصلاً به محیط مادی نیاز ندارد و در خلأ با c و در هوا به طور نامحسوسی کندتر حرکت می‌کند. به این فاصله عدد بدهید: 3.00 10^8 x تقسیم بر 343 حدود 875 000 است.
هواپیمایی در فاصلهٔ 30 km که در یک لحظه صدا و پیام بفرستد، پیام را در 100 میکروثانیه و صدا را در 87 ثانیه می‌رساند؛ تا صدا برسد، هواپیما 22 km پرواز کرده است. نمایش آن یک طناب در کلاس و یک چراغ‌قوه در آن سوی زمین بازی است: موج طناب آشکارا به طناب نیاز دارد و با سرعتی که طناب تعیین می‌کند حرکت می‌کند، و نور چراغ‌قوه بدون تأخیری که کسی بتواند اندازه بگیرد به آن سو می‌رسد. به‌صراحت فهرست کنید که طناب در چه چیزهایی با نور مشترک است (موج، طول موج، بسامد، سرعت ثابت و در نتیجه رابطهٔ وارون میان f و lambda) و در چه چیزهایی نیست (محیط مادی، سرعتی در حد متر بر ثانیه).

با قطبش تمام کنید، که نشان دادنش ارزان است و در درس 5 به کار می‌آید. میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی در جهت مشخصی، عمود بر جهت حرکتش، نوسان می‌کند. آنتن‌های ترانسپوندر هواپیما عمودی‌اند، پس موج ADS-B قطبش عمودی دارد؛ آنتن گیرنده هم باید عمودی باشد و اگر افقی شود تقریباً هیچ چیز نمی‌شنود. موج طنابی که به‌صورت عمودی تکان داده شود از یک

شکاف عمودی در یک جعبهٔ مقوایی رد می‌شود و شکاف افقی جلویش را می‌گیرد؛ دو تکه فیلم قطبنده (از یک عینک سه‌بعدی ارزان) که روبه‌روی پنجره عمود بر هم قرار گیرند همین را برای نور نشان می‌دهند. از کلاس بخواهید پیش‌بینی کنند که اگر آنتن گیرنده خوابانده شود دریافت چه می‌شود. آن‌ها این پیش‌بینی را در پروژه آزمایش خواهند کرد.

مثال حل‌شده برای تمرین

سامانهٔ دوم ADS-B، که هواپیماهای سبک در ایالات متحده به کار می‌برند، روی 978 MHz فرستاده می‌شود. طول موجش چقدر است، و یک آنتن ربع‌موج برای آن چه طولی خواهد داشت؟ (0.307 m؛ 7.7 cm.) دانش‌آموزی که این را حل کند درس 1 را یاد گرفته است.

درس 2 - فیزیک و ریاضی

زمان‌سنجی و موقعیت: هواپیما چگونه می‌داند کجاست، و یک شبکه چگونه هواپیمایی را پیدا می‌کند که جایش را نمی‌گوید

هر آنچه هواپیما دربارهٔ موقعیتش پخش می‌کند از ناوبری ماهواره‌ای می‌آید، و ناوبری ماهواره‌ای در اساس اندازه‌گیری زمان است. هر ماهوارهٔ GNSS که در ارتفاع حدود 20 200 km می‌چرخد یک ساعت اتمی دارد و سیگنالی می‌فرستد که موقعیت خودش و لحظهٔ دقیق ارسال را اعلام می‌کند. گیرنده لحظهٔ رسیدن را ثبت می‌کند. اختلاف این دو، ضرب در c، فاصله تا آن ماهواره است، و یک فاصلهٔ تنها گیرنده را روی کره‌ای با این شعاع به مرکز ماهواره قرار می‌دهد. بگذارید کلاس شمارش‌ها را به دست آورد: دو کره در یک دایره یکدیگر را قطع می‌کنند، سه کره در دو نقطه، که یکی از آن‌ها دور از سطح زمین است و می‌توان کنارش گذاشت. پس اگر ساعت گیرنده کامل باشد، سه ماهواره کافی است. اما چنین چیزی در کار نیست؛ یک نوسان‌گر کوارتز بسیار بیشتر از نانوثانیه‌های لازم جابه‌جا می‌شود. راه‌حل، که قلب زیبای این موضوع است، این است که خطای ساعت گیرنده مجهول چهارم در نظر گرفته شود و از ماهوارهٔ چهارم استفاده شود: چهار معادله با چهار مجهول (x، y، z و اختلاف ساعت)، که پیوسته حل می‌شوند. بنابراین یک گیرندهٔ GNSS به چهار ماهوارهٔ در دید نیاز دارد، و در کنار این کار زمان را با دقت چند ده نانوثانیه نگه می‌دارد، و به همین دلیل گیرنده‌های شبکهٔ درس 5 برای ساعت‌هایشان از همان ماهواره‌هایی استفاده می‌کنند که هواپیما به کار می‌برد.

مقدارها را روی تخته بنویسید و مدام به آن‌ها برگردید. نور در یک نانوثانیه 0.300 m و در یک میکروثانیه 300 m می‌رود. خطای زمانی 1 میکروثانیه یعنی خطای فاصلهٔ 300 m؛ دقت چندمتری یک گیرندهٔ امروزی با زمان‌سنجی در حد ده نانوثانیه متناظر است. زمان سفر از ماهواره‌ای درست در بالای سر 20 200 km / 3.00 x 10^5 km/s = 0.0673 s است، و از ماهواره‌ای نزدیک افق حدود 0.086 s، پس گیرنده اختلاف‌های چندمیلی‌ثانیه‌ای را با دقتی برابر صدمیلیونیم آن اندازه می‌گیرد. از کلاس بپرسید اگر ساعت یک ماهواره یک میکروثانیه جلو باشد چه می‌شود؛ باید ببینند که هر گیرنده‌ای که از آن استفاده می‌کند حدود 300 m در امتداد خطی به سمت آن جابه‌جا می‌شود، و به همین دلیل ساعت ماهواره‌ها چند بار در روز از زمین تصحیح می‌شود.

دو ارتفاع را از هم جدا کنید، چون پیام هر دو را حمل می‌کند و دانش‌آموزان همیشه می‌پرسند. حل ماهواره‌ای ارتفاعی هندسی نسبت به بیضی‌گون مرجع زمین می‌دهد. با این حال هواپیماها ارتفاع فشاری (بارومتریک) گزارش می‌کنند: فشار ایستای بیرون بدنه که از طریق «جو استاندارد بین‌المللی» به ارتفاع تبدیل می‌شود؛ این جو استاندارد در سطح دریا 1013.25 hPa و 15 درجه و کاهشی برابر 6.5 درجه در هر کیلومتر فرض می‌کند. در روزی که فشار واقعی با استاندارد فرق دارد، ارتفاع فشاری همهٔ هواپیماها به یک اندازه اشتباه است، و این دقیقاً همان چیزی است که جداسازی لازم دارد: دو هواپیما که سطح پروازی 350 و 360 را نشان می‌دهند، در هر هوایی 1 000 ft از هم فاصله دارند. پیام‌های موقعیت ADS-B ارتفاع فشاری را با گام‌های 25 فوتی حمل می‌کنند؛ پیام سرعت اختلاف ارتفاع فشاری و هندسی را، پس گیرنده می‌تواند هر دو را بازیابی کند. برای گروه بزرگ‌تر، رابطهٔ ISA یعنی p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255 تمرین خوبی با صفحه‌گسترده است: آن را وارون کنند تا h را از p به دست آورند و بررسی کنند که 11 000 m با حدود 227 hPa، یعنی یک‌پنجم فشار سطح دریا، متناظر است.

حالا مسئله را وارونه کنید. بعضی هواپیماها روی 1090 MHz بدون موقعیت ماهواره‌ای ارسال می‌کنند: ترانسپوندرهای قدیمی‌تر که فقط با شناسه و ارتفاع به رادار پاسخ می‌دهند، یا هواپیماهایی که GNSS آن‌ها مختل (پارازیت) شده است. شبکه‌ای از گیرنده‌ها باز هم می‌تواند جایشان را پیدا کند. فرض کنید چهار گیرنده با ساعت‌های همگام زمان رسیدن یک ارسال واحد را ثبت کنند. فرستنده نامعلوم است، گیرنده‌ها معلوم‌اند: این همان مسئلهٔ GNSS است که نقش معلوم و مجهول در آن عوض شده. پیامی که یک میکروثانیه زودتر از گیرندهٔ B به گیرندهٔ A رسیده، از نقطه‌ای فرستاده شده که 300 m به A نزدیک‌تر از B است، و مکان هندسی چنین نقطه‌هایی یک هذلولی‌گون با کانون‌های A و B است. سه جفت مستقل از چهار گیرنده سه هذلولی‌گون می‌دهند که محل تقاطعشان هواپیماست. این مولتی‌لیتریشن (چندجانبه‌سازی) است، و نیاز دارد که ساعت‌های گیرنده‌ها با دقت حدود 100 ns با هم هماهنگ باشند، که این را از ماهواره‌ها می‌گیرند. برای کلاس، آن را با تمرین حیاط مدرسه به دو بعد کاهش دهید: سه دانش‌آموز با کرنومتر در نقطه‌هایی اندازه‌گیری‌شده، نفر چهارمی که جایی پنهان شده دست می‌زند، آن سه نفر تأخیرها را پس از تصحیح زمان واکنش ثبت می‌کنند، و کلاس هذلولی‌ها را رسم می‌کند (یا ساده‌تر، از موقعیت‌های آزمایشی روی یک نقشهٔ مقیاس‌دار استفاده می‌کند) تا با 343 m/s جای کسی را که دست زده پیدا کند. سپس بپرسید برای انجام همین کار با رادیو در فاصلهٔ 200 km دقت زمان‌سنجی باید چقدر باشد، و بگذارید فاصلهٔ میان یک کرنومتر و یک ساعت اتمی را حس کنند.

مثال حل‌شده برای تمرین

دو گیرنده به فاصلهٔ 60 km یک پیام را با 50 میکروثانیه اختلاف ثبت می‌کنند. هواپیما چقدر به گیرندهٔ اول نزدیک‌تر بود؟ (15 km.) اگر ساعت‌ها نسبت به هم 1 میکروثانیه خطا داشتند، این چه خطایی در پاسخ ایجاد می‌کرد؟ (300 m.) دانش‌آموزی که بتواند توضیح دهد چرا پاسخ دوم به فاصله بستگی ندارد، فهمیده است که مولتی‌لیتریشن چه چیزی لازم دارد.

درس 3 - رایانه

پیام دیجیتال: 112 بیت، چگونه فرستاده می‌شوند، و خطاها چگونه شناسایی می‌شوند

ترانسپوندر هواپیما داده‌های ADS-B را به شکل یک «اسکوییتر گستردهٔ» Mode S می‌فرستد: یک پیش‌درآمد 8 میکروثانیه‌ای و پس از آن 112 بیت داده با سرعت دقیقاً یک بیت در هر میکروثانیه. درس را با پیش‌درآمد شروع کنید، چون به پرسشی پاسخ می‌دهد که دانش‌آموزان هنوز به فکرشان نرسیده: وقتی کانال پر از نویز و پر از هواپیماهای دیگر است، گیرنده از کجا می‌فهمد که یک پیام شروع شده است؟ پیش‌درآمد الگوی ثابتی از چهار پالس در 0، 1، 3.5 و 4.5 میکروثانیه است. رمزگشا پیوسته دنبال این الگو می‌گردد؛ وقتی آن را پیدا کند، هم می‌داند که پیامی در پی آن است و هم دقیقاً می‌داند هر خانهٔ بیتی کی شروع می‌شود. هر پروتکل دیجیتالی که دانش‌آموزان با آن آشنا شده‌اند، از Wi-Fi تا کد QR، چیزی معادل آن دارد، و این لحظهٔ خوبی برای گفتن آن است.

سپس مدولاسیون. یک رادیو می‌تواند روشن یا خاموش باشد؛ چگونه 1 یا 0 بفرستیم؟ ADS-B از مدولاسیون موقعیت پالس استفاده می‌کند: هر خانهٔ بیتی یک‌میکروثانیه‌ای به دو نیمه تقسیم می‌شود، و پالسی در نیمهٔ اول و سپس سکوت یعنی 1، سکوت و سپس پالس یعنی 0. چند بیت را به شکل پالس روی تخته رسم کنید و از کلاس بخواهید آن‌ها را بخوانند. سپس بپرسید چرا این روش بهتر از روش بدیهیِ «پالس یعنی 1، نبودِ پالس یعنی 0» است. با کمی راهنمایی دو دلیل پیدا می‌شود. همیشه دقیقاً یک پالس در هر بیت هست، پس گیرنده می‌تواند زمان‌بندی‌اش را حتی در یک رشته از صفرها قفل نگه دارد، و می‌تواند هر بیت را با این پرسش تعیین کند که کدام نیمه بلندتر بود، نه اینکه آیا پالس از یک آستانهٔ مطلق گذشته یا نه، و این رمزگشایی را نسبت به قدرت سیگنال بی‌حساس می‌کند. یک رشتهٔ طولانی از صفرها در روش ساده از سکوت قابل تشخیص نبود؛ در PPM یک ضرب‌آهنگ یکنواخت از پالس‌های نیمهٔ دوم است.

چهار بیت با مدولاسیون موقعیت پالس: 1، 0، 1، 1



هر خانه 1 میکروثانیه است. پالس در نیمهٔ اول: 1. پالس در نیمهٔ دوم: 0.

حالا چیدمان 112 بیت، که کلاس باید تا پایان درس بتواند آن را از حفظ بازسازی کند. بیت‌های 1 تا 5 قالب downlink هستند، که برای ADS-B از ترانسپوندر برابر 17 است. بیت‌های 6 تا 8 کد قابلیت هستند. بیت‌های 9 تا 32 نشانی 24 بیتی ICAO هستند، شناسهٔ دائمی هواپیما. بیت‌های 33 تا 88 فیلد پیام 56 بیتی هستند، که پنج بیت اولش، یعنی کد نوع، می‌گوید 51 بیت باقی‌مانده چه چیزی دارند: پیام شناسایی (کدهای نوع 1 تا 4) شناسهٔ پروازی هشت‌نویسه‌ای را به شکل هشت نویسهٔ 6 بیتی حمل می‌کند؛ موقعیت در هوا (9 تا 18) شامل 12 بیت ارتفاع فشاری، پرچمی که می‌گوید این قاب زوج است یا فرد، و برای هر کدام از عرض و طول جغرافیایی 17 بیت کدشده است؛ پیام سرعت (19) مؤلفه‌های شرقی-غربی و شمالی-جنوبی سرعت زمینی، آهنگ عمودی و اختلاف ارتفاع فشاری و هندسی را حمل می‌کند. بیت‌های 89 تا 112 توازن (parity) 24 بیتی هستند. حساب‌ها را تمرین دهید: 24 بیت نشانی 2^24 = 16 777 216 هواپیما می‌دهد؛ هشت نویسهٔ 6 بیتی هر کدام 64 نماد را ممکن می‌کنند، که برای حروف، ارقام و فاصله کافی است؛ 12 بیت ارتفاع با گام‌های 25 فوتی 102 400 فوت را پوشش می‌دهد؛ و 17 بیت عرض جغرافیایی، اگر به شکل ساده روی 180 درجه به کار رود، فقط 1.4 km دقت می‌دهد، و این پرسشی را پیش می‌کشد که «گزارش فشردهٔ موقعیت» (CPR) پاسخش را می‌دهد. CPR را در یک بند توضیح دهید: 17 بیت موقعیت را درون یک ناحیه با دقت چند متر می‌دهند، نه اینکه کدام ناحیه؛ هواپیما میان دو شبکهٔ ناحیه، زوج و فرد، جابه‌جا می‌شود، و گیرنده‌ای که یکی از هر کدام را داشته باشد می‌تواند ناحیه را بی‌ابهام تعیین کند و سپس با پیام‌های تکی ردیابی کند. این نمونهٔ ظریفی است از به دست آوردن دقت بیشتر از همان بیت‌ها با استفاده از زمان.

DF	CA	نشانی ICAO	محموله - ME	PI
5 بیت قالب downlink	3 بیت قابلیت	24 بیت شناسهٔ یکتای هواپیما	56 بیت موقعیت، ارتفاع، سرعت، شناسهٔ پروازی یا وضعیت، بسته به کد نوع در 5 بیت اول آن	24 بیت بررسی خطا (CRC)

یک پیام واقعی به کلاس بدهید و بگذارید آن را تشریح کنند. رشتهٔ هگزادسیمال 8D4840D6202CC371C32CE0576098 برابر 28 رقم هگز، یعنی 112 بیت است. تبدیل دو رقم اول، 8D، به دودویی 10001 101 را می‌دهد: DF = 17، CA = 5. شش رقم بعدی، 4840D6، نشانی ICAO هستند که جدول‌های تخصیص آن را به هلند نسبت می‌دهند. رقم‌های بعدی، 20 ...، با 00100 شروع می‌شوند، یعنی کد نوع 4، یک پیام شناسایی، و رمزگشایی نویسه‌های 6 بیتی پس از آن شناسهٔ پروازی KLM1023 را می‌دهد. شش رقم آخر، 576098، توازن هستند. کلاسی با یک صفحه‌گسترده یا چند خط Python می‌تواند کل رمزگشایی را در یک جلسه انجام دهد، و هدفی که باید دنبالش بود این توانایی است که رشته‌ای هگز را بگیرند و بگویند «این یک هواپیمای KLM است که شمارهٔ پروازش را اعلام می‌کند».

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

8D: قالب downlink برابر 17، قابلیت 5. 4840D6: نشانی ICAO، اختصاص‌یافته به هلند. 20...: کد نوع 4، شناسایی، شناسهٔ پروازی KLM1023. 576098: توازن 24 بیتی.

با توازن تمام کنید، چون ارزشمندترین ایدهٔ رایانه‌ای برای بسط دادن است. بالای یک فرودگاه شلوغ، پیام‌های هواپیماهای مختلف دائماً درگیرنده روی هم می‌افتند، و پالس‌ها در نویز هم گم می‌شوند؛ رمزگشا ناگزیر بیت‌های اشتباه سرهم خواهد کرد. فیلد 24 بیتی پایانی یک بررسی افزونگی چرخه‌ای (CRC) است: 88 بیت پیام به‌عنوان یک عدد دودویی بلند در نظر گرفته می‌شوند و، در حسابی ویژه که در آن تفریق همان یای انحصاری (XOR) است، بر یک مولد ثابت 25 بیتی تقسیم می‌شوند؛ باقی‌مانده همان CRC است. گیرنده تقسیم را روی بیت‌هایی که رمزگشایی کرده تکرار و مقایسه می‌کند. هر تک‌بیتِ خراب‌شده، هر دو بیت، و هر رشتهٔ پیوسته‌ای از خطاها به طول حداکثر 24 بیت باقی‌مانده را تغییر می‌دهد، پس پیام خراب رد می‌شود. ایده را در مقیاس کوچک با یک CRC چهار بیتی روی یک پیام 8 بیتی که با دست حل می‌شود نشان دهید، یا با نمونهٔ ساده‌ترِ رقم کنترلی روی یک بارکد؛ سپس از گروه بزرگ‌تر بخواهید CRC-24 واقعی را در چند خط کد پیاده کنند و بررسی کنند که توازن پیام نمونه درست درمی‌آید، و وارونه کردن یک بیت باعث رد شدنش می‌شود. این همان تشخیص خطاست که هر سامانهٔ امروزی انجام می‌دهد، آن هم در زمینه‌ای که یک خطای ناشناخته می‌تواند یک هواپیمای شبح را روی صفحهٔ کنترلر بگذارد.

مثال حل‌شده برای تمرین

یک ارسال کامل چقدر طول می‌کشد، و اگر یک ترانسپوندر 4.5 اسکوییتر گسترده در ثانیه بفرستد، چه کسری از زمان را صرف ارسال ADS-B می‌کند؟ (120 میکروثانیه؛ 540 میکروثانیه در هر ثانیه، 0.054 درصد.) اگر از همهٔ ارسال‌های دیگر روی این کانال چشم‌پوشی کنیم، در اصل چند هواپیما می‌توانند پیش از آنکه کانال دائماً اشغال شود در آن شریک باشند؟ (حدود 1 850، و به همین دلیل ازدحام بر فراز شلوغ‌ترین فضاهای هوایی یک دغدغهٔ مهندسی واقعی است.)

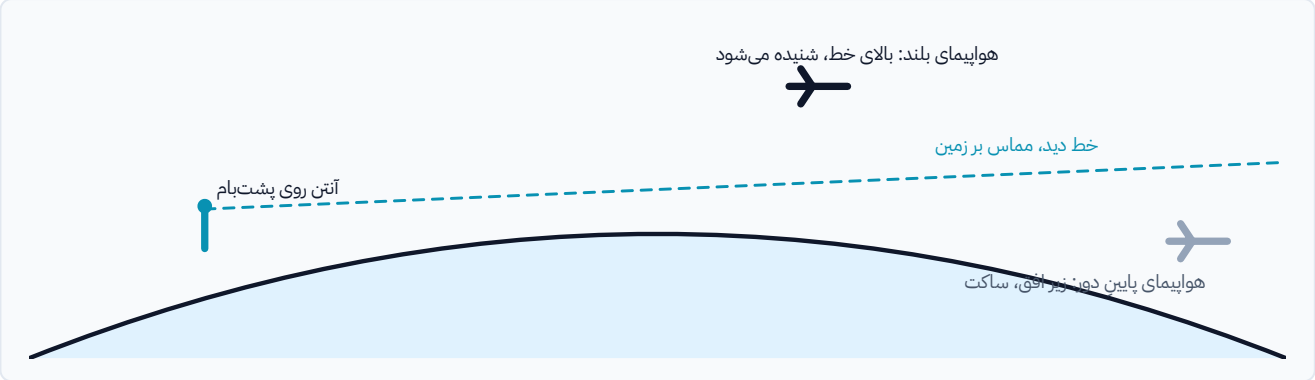
درس 4 - فیزیک

انتشار و بُرد: انحنای زمین و قانون عکس مجذور

یک گیرنده هواپیما را از چه فاصله‌ای می‌شنود؟ این پرسش دو پاسخ مستقل دارد، هندسی و انرژی‌محور، و هدف درس این است که هر دو را به دست آورد و کشف کند که طراحان کاری کرده‌اند که این دو با هم جور شوند. اول هندسه. در 1090 MHz رادیو به شکل مفیدی دور زمین پراش نمی‌یابد؛ مثل نور رفتار می‌کند و در خط راست حرکت می‌کند. بنابراین گیرنده فقط هواپیماهای بالای افق خود را می‌شنود، یعنی هواپیماهایی که خط راستی از آن‌ها تا آنتن از زمین نمی‌گذرد. فاصلهٔ افق را با کلاس به دست آورید. آنتنی در ارتفاع h بالای کره‌ای به شعاع R افقی را می‌بیند که در آن خط دید بر کره مماس است. مماس، شعاعِ نقطهٔ تماس و شعاعِ آنتن در نقطهٔ تماس زاویهٔ قائمه می‌سازند، پس طبق فیثاغورس d^2 + R^2 = (R + h)^2، که d^2 = 2Rh + h^2 را می‌دهد. چون h در کنار R بسیار کوچک است، d = sqrt(2Rh). با R = 6 371 km و h بر حسب متر، d بر حسب کیلومتر = = sqrt(2 x 6371 x h / 1000). 3.57 sqrt(h). چگالی جو، و در نتیجه ضریب شکست آن، با ارتفاع کم می‌شود و این پرتوهای رادیویی را کمی به پایین خم می‌کند؛ تصحیح استاندارد زمین را طوری در نظر می‌گیرد که گویی شعاعش چهار-سوم شعاع واقعی است، و 3.57 را با 4.12 جایگزین می‌کند. خط دید کامل از آنتنی در ارتفاع h1 تا هواپیمایی در ارتفاع h2 مجموع دو فاصلهٔ افق است:

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

4.12 x (4.47 + 104.9) = 451 km. 000 1 همان آنتن، هواپیما در 4.12 x (4.47 + 31.6) = 149 km. 30 هواپیما روی باند در فاصلهٔ 4.12 x (4.47 + 2) = 27 km، پس شنیده نمی‌شود. 000 11 m، آنتن روی پشت‌بامی به ارتفاع 20 m: 4.12 x



از کلاس بخواهید نمودار d را بر حسب h2 برای ارتفاع آنتن مدرسهٔ خودشان رسم کنند؛ منحنی، که در ابتدا تند است و بعد صاف می‌شود، شکل پوشش هر گیرنده را توضیح می‌دهد: دایره‌ای به شعاع 400 km و بیشتر برای ترافیک در حال کروز، چند ده کیلومتر برای هواپیماهای در حال نزدیک شدن به فرودگاه، و هیچ چیز روی زمین مگر در فرودگاه همسایه. همچنین توضیح می‌دهد چرا ارتفاع از هر ویژگی دیگر گیرنده مهم‌تر است، و چرا تپه‌ای میان شما و فرودگاه، یا بال خود هواپیما وقتی دور می‌زند و دور می‌شود، مسیر را در یک لحظه قطع می‌کند. نمایش حیاط مدرسه از دورهٔ ابتدایی، یعنی اینکه از روی نیمکت دورتر از حالت چمباتمه دیده می‌شود، برای این گروه سنی کوچک نیست اگر پس از آن اثبات بیاید؛ نکته این است که حالا می‌دانند چرا.

حالا انرژی. یک ترانسپوندر توانی اوج در حد چند صد وات را تقریباً به طور یکسان در همهٔ جهت‌های افقی تابش می‌کند. در فاصلهٔ d این توان روی کره‌ای به مساحت 4 pi d^2 پخش شده، پس توانی که آنتنی با مساحت مؤثر ثابت دریافت می‌کند به نسبت 1 / d^2 کم می‌شود: قانون عکس مجذور، که کلاس باید آن را از مساحت کره به دست آورد نه اینکه حفظش کند. دو برابر فاصله، یک‌چهارم توان؛ ده برابر، یک‌صدم. مهندسان رادیو اتلاف میان یک فرستندهٔ همسانگرد و یک گیرندهٔ همسانگرد را با دسی‌بل بیان می‌کنند، و فرمول استاندارد، که گروه بزرگ‌تر می‌تواند آن را بپذیرد یا از مساحت مؤثر یک آنتن، lambda^2 / 4 pi، به دست آورد، چنین است:

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

در 400 km و 1090 MHz: 20 x 2.60 + 20 x 3.04 + 32.44 = 52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 dB. 250 یک فرستندهٔ W 54+ برابر dBm یا یک میلیونیمِ یک میلیونیم وات، 10^-13 W x است، یعنی حدود 8 dBm است؛ توان دریافتی 54 - 145 = -91.

اگر کلاس با دسی‌بل آشنا نیست، چند دقیقه به آن اختصاص دهید، چون ضربی را که در گسترهٔ چهارده مرتبهٔ بزرگی است به جمع تبدیل می‌کند، و چون خود این عدد آموزنده است: گیرنده‌ای روی پشت‌بام سیگنالی را تشخیص می‌دهد که 14.5^10 بار ضعیف‌تر از سیگنالی است که از هواپیما بیرون آمده. یک گیرندهٔ آماتوری خوب می‌تواند تا حدود -100 dBm رمزگشایی کند، پس در 400 km حدود 9 dB حاشیه هست، یعنی محدودیت انرژی و افق هندسی برای یک هواپیمای مسافربری در حال کروز در یک جا قرار می‌گیرند. این تصادفی نیست؛ توان ترانسپوندر و استانداردهای گیرنده طوری تعیین شده‌اند که هواپیما تا افق شنیده شود و نه خیلی فراتر از آن، و این مانع می‌شود که کانال با ارسال‌های کشور همسایه پر شود.

دو نکتهٔ تکمیلی برای گروه بزرگ‌تر. اول، دوپلر: هواپیمایی که با 250 m/s نزدیک می‌شود بسامد دریافتی را به اندازهٔ f x v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz جابه‌جا می‌کند، کمتر از یک میلیونیم بسامد حامل، که گیرنده هرگز متوجهش نمی‌شود؛ این را با جابه‌جاییِ دوپلرِ شنیدنیِ صدای هواپیما مقایسه کنید، که در آن v / c برابر 250 / 343 است و زیر و بمی صدا هنگام عبور تقریباً یک اکتاو تغییر می‌کند. دوم، زمان پرواز سیگنال: 400 km با سرعت c برابر 1.33 ms است، پس موقعیت در پیام از قبل 1.33 ms کهنه است، و در این مدت هواپیما 33 cm جابه‌جا شده؛ برای نقشه ناچیز است، اما برای مولتی‌لیتریشن درس 2، که دقیقاً با همین میکروثانیه‌ها زنده است، تعیین‌کننده است.

مثال حل‌شده برای تمرین

گیرنده‌ای روی دکلی به ارتفاع 10 m یک هواپیمای در حال کروز در 11 000 m را می‌شنود اما یک هواپیمای سبک در 600 m را که 130 km دورتر است نمی‌شنود. آیا هواپیمای سبک زیر افق است؟ (افق: 4.12 km x (3.16 + 24.5) = 114، پس بله.) گیرنده باید در چه ارتفاعی باشد تا آن را بشنود؟ (باید 4.12 x (sqrt(h1) + 24.5) = 130 باشد، پس sqrt(h1) = 7.05 و h1 = 50 m.)

درس 5 - فیزیک و مهندسی

آنتن‌ها و گیرنده‌ها: از یک موج 27 سانتی‌متری تا یک نقطه روی نقشه

آنتن رسانایی است که موج الکترومغناطیسیِ عبوری در آن جریان متناوب القا می‌کند؛ آنتن گیرنده و آنتن فرستنده یک وسیله‌اند که در جهت‌های مخالف کار می‌کنند، و این وارونگی‌پذیری (reciprocity) را باید به‌صراحت به کلاس گفت. جریان القایی وقتی بیشترین مقدار را دارد که رسانا به تشدید برسد: وقتی طولش طوری باشد که توزیع جریان در طول آن با نوسان موج جور شود، درست همان‌طور که سیمی با طول مناسب با یک نت خاص، یا یک تاب با ریتم خاصی از هل دادن‌ها، به تشدید می‌افتد. تشدید بنیادی یک رسانای راست در نیم طول موج است، یعنی 13.75 cm در 1090 MHz، با بیشترین جریان در وسط و صفر در دو سر. آنتن کاربردی ADS-B، روی هواپیما و روی بیشتر گیرنده‌ها، یک تک‌قطبی ربع‌موج است: یک عنصر عمودی 6.9 سانتی‌متری که روی یک صفحهٔ زمین رسانا ایستاده، صفحه‌ای که از نظر الکتریکی آن را آینه‌وار بازتاب می‌دهد تا عنصر و تصویرش با هم دوقطبی نیم‌موج را بسازند. روی هواپیما بدنه همان صفحهٔ زمین است؛ یک آنتن 1090 MHz خریداری‌شده همین هندسه را درون لوله‌اش پنهان کرده، چند بار روی هم چیده‌شده تا حساسیتش را به سمت افق متمرکز کند. مدلی که در کلاس از یک میلهٔ 6.9 سانتی‌متری روی یک درِ قوطی ساخته شود هندسه و طول را نشان می‌دهد، و با خط‌کش در برابر موج 27.5 سانتی‌متری اندازه گرفته می‌شود؛ اما گیرندهٔ پروژه از آنتنی استفاده می‌کند که در کارخانه تنظیم شده، چون چند میلی‌متر خطا آنتن دست‌ساز را از تنظیم خارج می‌کند و فقط بخشی از آسمان را می‌شنود.

الگوی تابش را بسط دهید، چون چیزی را پیش‌بینی می‌کند که کلاس می‌تواند مشاهده کند. یک تک‌قطبی عمودی به سمت افق قوی‌ترین تابش و دریافت را دارد و در امتداد محور خودش هیچ؛ حساسیت آن، اگر در سه بعد رسم شود، یک دونات حلقه‌ای است که آنتن از سوراخش رد شده. پس یک گیرنده معمولاً هواپیمایی را در 300 km عالی می‌شنود و هواپیمایی را که درست از بالای سر می‌گذرد چند ثانیه گم می‌کند، و کلاس می‌تواند این را روی گیرندهٔ خودش ببیند. یک آنتن هم‌خط (collinear)، یعنی چند عنصر تشدیدی روی هم، دونات را پهن‌تر می‌فشارد و حساسیت در افق را، جایی که هواپیماهای دور هستند، به بهای سوراخ بالای سر افزایش می‌دهد: این بهرهٔ آنتن است که با dBi بیان می‌شود، و از توزیع دوبارهٔ حساسیت می‌آید، هرگز از ساختن آن. قطبش، از درس 1، حالا پیامدی عملی دارد که پروژه آن را آزمایش می‌کند: آنتن باید عمودی باشد.

میان آنتن و رایانه سه مرحله هست که هر کدام یک درس کوچک است. یک فیلتر میان‌گذر 1090 MHz را عبور می‌دهد و ارسال‌های بسیار قوی‌تر تلفن همراه را، که چند صد مگاهرتز دورترند و در غیر این صورت تقویت‌کننده را اشباع می‌کردند، رد می‌کند. یک تقویت‌کنندهٔ کم‌نویز، که کنار آنتن قرار می‌گیرد نه کنار گیرنده، سیگنال را پیش از ورود به کابل هزار برابر می‌کند؛ ترتیب مهم است، چون یک کابل هم‌محور در 1090 MHz در هر ده متر تقریباً نیمی از سیگنال، یعنی 3 dB، را از دست می‌دهد، و تقویت پس از اتلاف نویز کابل را هم همراه با سیگنال تقویت می‌کند. سپس رادیوی نرم‌افزاری (SDR): یک وسیلهٔ USB بیست‌یورویی که در اصل به‌عنوان گیرندهٔ تلویزیون ساخته شده بود، و سیگنال را به باند پایه پایین می‌آورد و آن را دو میلیون بار در ثانیه نمونه‌برداری می‌کند و به جریانی از اعداد تبدیل می‌کند. از این نقطه به بعد مسئلهٔ رادیویی یک مسئلهٔ برنامه‌نویسی است. نرم‌افزار رایگان جریان نمونه‌ها را برای یافتن الگوی پیش‌درآمد می‌کاود، می‌سنجد کدام نیمهٔ هر خانهٔ میکروثانیه‌ای انرژی بیشتری دارد، 112 بیت را سرهم می‌کند، CRC را حساب می‌کند، و اگر قبول شد، فیلدها را رمزگشایی می‌کند. سپس یک ردیاب قاب‌های موقعیت زوج و فرد را جفت می‌کند، موقعیت، سرعت و شناسایی را بر اساس نشانی ICAO ادغام می‌کند، و وضعیت هر هواپیما را تا زمانی که پیام‌ها دیگر نرسند نگه می‌دارد.

زنجیره را به شکل نموداری که کلاس خودش رسم می‌کند ارائه دهید، با کمیت هر مرحله: نانوولت‌های جریان متناوب در آنتن؛ میکروولت پس از تقویت‌کننده؛ دو میلیون عدد 8 بیتی در ثانیه از خروجی SDR؛ قاب‌های 112 بیتی از رمزگشا، شاید چند صد در ثانیه؛ یک رکورد برای هر هواپیما از ردیاب. نکته‌ای که باید جا بیفتد این است که یک نقطه روی نقشه انتهای زنجیره‌ای است که هر حلقه‌اش ایده‌ای است که حالا آن را می‌فهمند: تشدید، فیلتر کردن، تقویت، نمونه‌برداری، تطبیق الگو، رمزگشایی، بررسی خطا، تجمیع.

مثال حل‌شده برای تمرین

یک کابل در 1090 MHz در هر 10 m به اندازهٔ 3 dB اتلاف دارد. پس یک مسیر 20 متری چه کسری از سیگنال را از دست می‌دهد؟ (6 dB، سه‌چهارم.) اگر حد گیرنده -100 dBm باشد و سیگنال هواپیمایی در 400 km در آنتن -91 dBm باشد، آیا سیگنال بدون تقویت‌کننده از کابل جان سالم به در می‌برد؟ (به زحمت: -97 dBm. هر اتلاف دیگری، باران روی اتصال‌ها یا مسیری بلندتر، و هواپیمای لب افق ناپدید می‌شود. به همین دلیل تقویت‌کننده کنار آنتن قرار می‌گیرد.)

پروژه - دو تا چهار هفته

یک گیرنده بسازید و فیزیک را در برابر آسمان آزمایش کنید

پروژه پنج درس را به اندازه‌گیری تبدیل می‌کند. تجهیزات عبارت‌اند از یک دانگل رادیوی نرم‌افزاری USB (حدود 25 یورو)، یک آنتن 1090 MHz تنظیم‌شده در کارخانه (50 تا 70 یورو)، چند متر کابل هم‌محور، و یک لپ‌تاپ یا یک Raspberry Pi که یکی از رمزگشاهای رایگان را اجرا می‌کند (dump1090 و نسخه‌های برگرفته از آن استاندارد هستند). نصب یک بعدازظهر طول می‌کشد و نرم‌افزار در عرض چند دقیقه جدولی از هواپیماها با نشانی‌های ICAO، شناسه‌های پروازی، موقعیت‌ها، ارتفاع‌ها و سرعت‌هایشان، و یک نقشه نشان می‌دهد. همه چیز در پروژه فقط دریافتی است؛ هیچ چیز ارسال نمی‌کند، و کلاس باید بداند که ارسال روی بسامدهای هوانوردی هم غیرقانونی است و هم خطرناک. دسترسی به پشت‌بام به مجوز معمول مدرسه نیاز دارد؛ پنجره‌ای در طبقهٔ بالا رو به مسیرهای اصلی ترافیک شروع کاملاً خوبی است. صفحهٔ «فیدر شوید» در این سایت همین نصب را گام به گام توضیح می‌دهد و به گیرندهٔ مدرسه اجازه می‌دهد به نقشهٔ زنده داده بدهد.

بررسی نخست افق رادیویی است. رمزگشا برای هر هواپیما فاصله و ارتفاعی را که آخرین بار در آن شنیده شده گزارش می‌کند. در طول یک روز، بیشترین بُردی را که هواپیماها در چند بازهٔ ارتفاعی دریافت شده‌اند جمع کنید و بُرد را بر حسب ارتفاع رسم کنید. دانش‌آموزان فرمول درس 4 و ارتفاع آنتن را دارند؛ باید پیش از دیدن داده‌ها منحنی را پیش‌بینی کنند و سپس مقایسه کنند. تطابق معمولاً برای هواپیماهای بلند خوب و برای هواپیماهای پایین بدتر است، و بحث دربارهٔ چرایی آن (ساختمان‌ها، پستی و بلندی زمین، سوراخ بالای سر آنتن، سایهٔ خود هواپیما) همان رویارویی میان نظریه و اندازه‌گیری است که هیچ کتاب درسی نمی‌تواند ارائه دهد. نقشه‌ای از دورترین هواپیماهای شنیده‌شده در هر جهت، که نرم‌افزار رسم می‌کند، پستی و بلندی کل منطقه را به شکل سایه‌هایی در پوشش نشان می‌دهد.

بررسی دوم آنتن است. نرخ پیام‌ها و بیشترین بُرد را با آنتن در داخل اتاق، کنار پنجره و روی پشت‌بام؛ عمودی و خوابیده؛ ایستاده روی سطحی فلزی و دور از هر فلزی، مقایسه کنید. هر مقایسه ادعای مشخصی از درس‌های 1 و 5 را می‌آزماید، و هر نتیجه باید ابتدا پیش‌بینی شود. آزمون قطبش چشمگیرترین است: آنتن خوابیده بیشتر هواپیماهایش را از دست می‌دهد.

بررسی سوم داده است. ترافیک یک روز کامل را ثبت کنید و از آن پرسش کنید: شلوغ‌ترین ساعت، توزیع ارتفاع‌های کروز (دانش‌آموزان انتظار پراکندگی دارند و می‌بینند که بیشتر هواپیماهای مسافربری میان 10 000 و 12 000 m هستند)، آهنگ صعود پروازهای خروجی از نزدیک‌ترین فرودگاه، کشورهایی که هواپیماهایشان بیش از همه عبور می‌کنند (از تخصیص نشانی‌های ICAO). گروه بزرگ‌تر می‌تواند خودش پیام‌های خام را از هگزی که نرم‌افزار ثبت می‌کند رمزگشایی کند و CRC را با کد خودش بررسی کند. کلاسی که گیرندهٔ

دومی در یک مدرسهٔ همکار در فاصلهٔ 30 کیلومتر یا بیشتر دارد، هر دو با خروجی دارای مهر زمانی GNSS، می‌تواند مولق‌لیتریشن دوبعدی هواپیمایی را که هر دو می‌شنوند امتحان کند و آن را با موقعیتی که هواپیما پخش کرده مقایسه کند: بلندپروازانه‌ترین نتیجهٔ دوره، و نتیجه‌ای واقعی.

با پرسش‌هایی تمام کنید که سامانه پیش می‌کشد و به آن‌ها پاسخ نمی‌دهد. پیام‌ها امضا ندارند، پس یک فرستنده می‌تواند هواپیمای شبحی پخش کند؛ چه چیزی از سامانه دفاع می‌کند، و نسخهٔ امضاشده چه هزینه‌ای دارد؟ هواپیما به ماهواره‌هایی وابسته است که می‌توان آن‌ها را مختل کرد؛ وقتی مختل می‌شوند تصویر کنترلر چه می‌شود؟ داده‌ها هواپیماها را شناسایی می‌کنند، و یک هواپیما می‌تواند یک شخص را شناسایی کند؛ چه کسی باید بتواند چه کسی را دنبال کند؟ کلاسی که گیرنده را ساخته شایستهٔ این پرسش‌هاست، و این پرسش‌ها موضوع خوبی برای یک انشای پایانی یا مناظره‌اند.

پاسخ چالش‌های دانش‌آموز

صفحهٔ دانش‌آموز هشت چالش مطرح می‌کند، یک یا دو برای هر درس، که می‌توان از آن‌ها به‌عنوان تکلیف یا آزمون پایان دوره استفاده کرد. پاسخ‌ها، همراه با استدلالی که یک پاسخ با نمرهٔ کامل باید داشته باشد:

1. طول موج در 1090 MHz: lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. عنصر ربع‌موج: 6.9 cm. استدلال: c = f x lambda، که در آن سرعت ثابت نور رابطه‌ای وارون را تحمیل می‌کند.
2. نور 3.00 x 10^8 / 343 ≈ 875 000 بار، یعنی حدود 87 s طول می‌کشد؛ هواپیما با 250 m/s در این مدت 22 km جابه‌جا می‌شود.
3. خطای ساعت 2 میکروثانیه‌ای خطای فاصله‌ای برابر 2 x 10^-6 x 3 x 10^8 = 600 m می‌دهد. چهار ماهواره لازم است چون اختلاف ساعت گیرنده مجهول چهارمی در کنار x، y و z است.
4. 2^24 = 16 777 216 نشانی. یک پیام 112 بیتی با یک بیت در هر میکروثانیه 112 میکروثانیه طول می‌کشد، و با پیش‌درآمد 120.
5. در 8D4840D6...، 10001101 برابر 17 است: پنج بیت اول 10001 برابر 17 است، پس DF = 17، یعنی پیام ADS-B از یک ترانسپوندر Mode S؛ سه بیت بعدی، 101، 5 = CA را می‌دهند. 4840D6 نشانی ICAO است.
6. افق رادیویی از آنتنی به ارتفاع 15 m تا هواپیمایی در 9 000 m: 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km. برای هواپیمایی در 300 m: 4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km.
7. دو برابر شدن فاصله توان دریافتی را یک‌چهارم می‌کند، چون همان توان فرستاده‌شده روی کره‌ای با چهار برابر مساحت پخش می‌شود. اتلاف مسیر در 200 km و 1090 MHz: 20 x 2.30 + 60.7 + 32.4 = 139 dB، یعنی 6 dB کمتر از 400 km، که با ضریب چهار سازگار است.
8. آنتنی که افقی خوابانده شود نسبت به موج با قطبش عمودی قطبش متقاطع دارد و خیلی کم دریافت می‌کند؛ جریان القایی به مؤلفهٔ میدان الکتریکی در امتداد رسانا بستگی دارد. گیرنده‌ای در طبقهٔ همکف بُرد را از دست می‌دهد چون فاصلهٔ افقش، 4.12 x sqrt(h1)، کوچک می‌شود و چون ساختمان‌ها خط دید را می‌بندند.

گام بعدی

پروژه، گام به گام

پروژهٔ درس 6 یک گیرنده را فرض می‌گرفت؛ کارگاه عملی آن را می‌سازد. این کارگاه برای کسی نوشته شده که هرگز از Raspberry Pi استفاده نکرده است: فهرست خرید با قیمت‌ها، آنتنی که باید انتخاب کرد، جای نصب آن و اتلاف کابل، آماده‌سازی Pi، سه فرمانی که فیدر Dataero را نصب می‌کنند، ثبت ایستگاه به نام خود، تنظیم بهره (gain)، و پنج اندازه‌گیری، یکی برای هر درس، که فیزیک را در برابر آسمان می‌آزمایند. ایستگاهی که به Dataero داده می‌دهد یک داشبورد، یک نقشهٔ پوشش و یک سال سابقه در اختیار کلاس می‌گذارد تا با آن کار کند.

باز کردن کارگاه عملی `https://radar.dataero.eu/fa/learning/workshop`