فیزیک و رایانه - سنین 12 تا 18 سال

رمزگشایی آسمان

سطر هگزادسیمال زیر یک پیام واقعی است که یک هواپیمای واقعی تقریباً دو بار در ثانیه می‌فرستد. این پیام در 112 میلیونیم ثانیه اعلام می‌کند که هواپیما کیست و، در پیام‌های همراهش، کجاست، در چه ارتفاعی است و با چه سرعتی حرکت می‌کند. در این دوره هر آنچه برای فهمیدن آن لازم است را قدم به قدم بررسی می‌کنیم: فیزیک موجی که پیام بر آن سوار است، زمان‌سنجی‌ای که موقعیت هواپیما را به آن می‌دهد، کدگذاری‌ای که پیام را در 112 بیت جا می‌دهد، هندسه‌ای که محدود می‌کند پیام تا چه فاصله‌ای شنیده شود، و گیرنده‌ای که می‌توانید بسازید تا خودتان آن را بشنوید.

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

فهرست مطالب

ADS-B چیست، در یک صفحه
درس 1 موج: رادیو به‌عنوان نوری نامرئی
درس 2 زمان‌سنجی و موقعیت: هواپیما چگونه می‌داند کجاست
درس 3 پیام: 112 بیت، و اینکه خطاها چگونه شناسایی می‌شوند
درس 4 بُرد: انحنای زمین و قانون عکس مجذور
درس 5 آنتن‌ها و گیرنده‌ها: از یک موج 27 سانتی‌متری تا یک نقطه روی نقشه
چالش‌ها
گام بعدی آن را بسازید

ADS-B چیست، در یک صفحه

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

یک «اسکوییتر گسترده» همان‌طور که گیرنده آن را ثبت می‌کند: 28 رقم هگزادسیمال، یعنی 112 بیت. تا درس 3 خواهید توانست تک‌تک فیلدهای آن را بخوانید.

کنترل ترافیک هوایی باید همیشه بداند هر هواپیما کجاست تا هواپیماها را از هم دور نگه دارد: یک هواپیمای مسافربری در حال پرواز کروز در هر ثانیه 250 m جلو می‌رود، و قواعد جداسازی میان هواپیماهای تحت کنترل رادار فاصله‌ای برابر 300 m در راستای عمودی یا 9 km در راستای افقی می‌خواهند. هفتاد سال راهِ دانستن این موضوع رادار بود: یک ایستگاه زمینی پالسی می‌فرستد و زمان بازگشت پژواک را می‌سنجد، یا در نوع پیشرفته‌تر آن، یعنی رادار ثانویه، از ترانسپوندر هواپیما پرسش می‌کند و ترانسپوندر روی 1090 MHz با شناسه و ارتفاع پاسخ می‌دهد. رادار محدودیت‌هایی دارد: به توان بسیار زیادی نیاز دارد، هر هواپیما را در هر دور چرخش آنتن فقط یک بار می‌بیند، و نمی‌تواند اقیانوس‌ها یا کوهستان‌ها را پوشش دهد.

ADS-B، یعنی Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (مراقبت وابستهٔ خودکار - پخش همگانی)، مسئله را وارونه می‌کند. هر هواپیمای امروزی یک گیرندهٔ ناوبری ماهواره‌ای دارد و بنابراین موقعیت خودش را با دقت چند متر می‌داند. ADS-B به سادگی از ترانسپوندر هواپیما می‌خواهد که این موقعیت را، همراه با شناسه، ارتفاع و سرعت، تقریباً دو بار در ثانیه روی 1090 MHz اعلام کند، آن هم نه برای گیرنده‌ای خاص. «خودکار» است چون چیزی آن را راه نمی‌اندازد؛ «وابسته» است چون اطلاعاتش تماماً از ابزارهای خود هواپیما می‌آید؛ «مراقبت» است چون هدفش دانستن جای هواپیماهاست؛ و «پخش همگانی» است چون

بدون رمز برای هر کسی که گوش بدهد فرستاده می‌شود. از سال 2020 برای بیشتر هواپیماها در فضای هوایی اروپا و آمریکا اجباری شده است. کنترلرها آن را در کنار رادار به کار می‌برند، هواپیماهای دیگر با آن یکدیگر را می‌بینند، و یک گیرندهٔ USB بیست‌وپنج یورویی روی پشت‌بام مدرسه دقیقاً همین پیام‌ها را می‌شنود.

برای فهمیدن این سامانه باید پنج چیز را بفهمید و هر کدام یک درس است: موج الکترومغناطیسی‌ای که پیام را حمل می‌کند؛ زمان‌سنجی‌ای که موقعیت هواپیما را به آن می‌دهد و به یک شبکه اجازه می‌دهد هواپیمایی را که جایش را نمی‌گوید پیدا کند؛ پیام دیجیتال و اینکه خطاهای آن چگونه شناسایی می‌شوند؛ هندسه و انرژی‌ای که محدود می‌کنند پیام تا کجا شنیده شود؛ و آنتن و گیرنده‌ای که آن را دوباره به داده تبدیل می‌کنند. روایت کامل در دورهٔ مرجع آمده است؛ فصل‌های 3 و 5 آن را پیش از درس 3، و فصل‌های 6 تا 8 را پیش از درس‌های 4 و 5 بخوانید.

درس 1

موج: رادیو به‌عنوان نوری نامرئی

پیام به شکل یک موج الکترومغناطیسی از هواپیما بیرون می‌آید: میدان‌های الکتریکی و مغناطیسیِ نوسان‌کننده‌ای که بدون هیچ محیط مادی و با سرعت نور، c = 3.00 x 10^8 m/s، در فضا منتشر می‌شوند. نور مرئی همین پدیده است در بسامدی بالاتر؛ چشم شما به حدود 4 تا 8 x 10^14 Hz حساس است، در حالی که ADS-B با 1.09 x 10^9 Hz فرستاده می‌شود، یعنی نیم میلیون بار پایین‌تر. میان پیام هواپیما و نوری که از این صفحه می‌آید هیچ تفاوت ماهوی وجود ندارد، تفاوت فقط در بسامد است.

چون موج با سرعت ثابتی حرکت می‌کند، بسامدش طول موجش را تعیین می‌کند. موج در یک ثانیه c متر جلو می‌رود و f چرخه کامل می‌کند، پس هر چرخه c / f متر جا می‌گیرد: c = f x lambda. برای ADS-B داریم lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. موجی که میان هواپیما و آنتن شما رد می‌شود قله‌هایی با فاصلهٔ 27.5 cm دارد و در طیف، میان سیگنال تلفن همراه (17 cm) و یک ایستگاه رادیویی FM (3 m) قرار می‌گیرد. این طیف را خودتان روی یک محور لگاریتمی از 6^10 Hz تا 18^10 Hz رسم کنید و رادیو FM، ADS-B، تلفن همراه، Wi-Fi، فروسرخ، نور مرئی و پرتو ایکس را روی آن بگذارید. موج هواپیما در میان چیزهایی است که در جیب شماست.

```
c = f x lambda
3.00 x 10^8 m/s = 1.09 x 10^9 Hz x 0.275 m
```

موج رادیویی صدا نیست. صدا یک موج فشاری در یک محیط مادی است که در هوا با 343 m/s، در آب با 1 500 m/s حرکت می‌کند و در خلأ اصلاً حرکت نمی‌کند. رادیو نور است: به محیط مادی نیاز ندارد، و به همین دلیل از خلأ میان ماهواره و هواپیما می‌گذرد، و با ضریب 3.00 343 / 10^8 x، یعنی حدود 875 000، سریع‌تر است. اگر هواپیمایی در فاصلهٔ 30 km در یک لحظه هم صدا و هم پیام بفرستد، پیام در 100 میکروثانیه می‌رسد؛ صدا 87 ثانیه بعد می‌رسد و تا آن موقع هواپیما 22 km پرواز کرده است. موج روی طناب در ویژگی‌هایی که مهم‌اند با نور مشترک است، یعنی طول موج، بسامد و سرعت ثابت، به طوری که تکان دادن سریع‌تر موج‌های کوتاه‌تر می‌سازد نه موج‌های سریع‌تر؛ تفاوتش در این است که به طناب نیاز دارد.

یکی از ویژگی‌های موج در درس 5 اهمیت پیدا می‌کند: قطبش آن. میدان الکتریکی در جهت مشخصی، عمود بر جهت حرکت، نوسان می‌کند. آنتن‌های هواپیما عمودی‌اند، پس موج ADS-B قطبش عمودی دارد و آنتن گیرنده‌ای که به پهلو خوابانده شود تقریباً هیچ چیزی از آن دریافت نمی‌کند، درست مثل موج طنابی که به‌صورت عمودی تکان داده شود و یک شکاف افقی جلوی آن را می‌گیرد. همین حالا پیش‌بینی کنید که اگر آنتن افقی باشد بُرد گیرنده‌تان چه می‌شود؛ آن را در پروژه آزمایش خواهید کرد.

درس 2

زمان‌سنجی و موقعیت: هواپیما چگونه می‌داند کجاست

موقعیتی که در هر پیام ADS-B هست از ناوبری ماهواره‌ای می‌آید، و ناوبری ماهواره‌ای در اصل اندازه‌گیری زمان است. در هر سامانه (GPS، Galileo، GLONASS، BeiDou) حدود سی ماهواره در ارتفاع تقریبی 20 200 km می‌چرخند، هر کدام با یک ساعت اتمی، و هر کدام سیگنالی می‌فرستد که موقعیت خودش و لحظهٔ دقیق ارسال را اعلام می‌کند. گیرندهٔ روی هواپیما لحظهٔ رسیدن را ثبت می‌کند. اختلاف این دو، ضرب در c، فاصله تا آن ماهواره است؛ از ماهواره‌ای که درست بالای سر است، سیگنال 20 200 / 300 000 = 0.0673 s طول می‌کشد. یک فاصله گیرنده را روی کره‌ای به مرکز آن ماهواره قرار می‌دهد؛ دو کره در یک دایره به هم می‌رسند؛ سه کره در دو نقطه، که یکی از آن‌ها دور از زمین است و کنار گذاشته می‌شود. اگر گیرنده ساعت کاملی داشت، سه ماهواره کافی بود. اما گیرنده یک کریستال کوارتز دارد که به اندازهٔ میکروثانیه‌ها جابه‌جا می‌شود، و یک میکروثانیه یعنی 300 m خطای فاصله. پس گیرنده خطای ساعت خودش را مجهول چهارم در نظر می‌گیرد و از ماهوارهٔ چهارم استفاده می‌کند: چهار معادله، چهار مجهول (x، y، z و اختلاف ساعت)، که پیوسته حل می‌شوند. در کنار این کار، هر گیرندهٔ ماهواره‌ای زمان را با دقت چند ده نانوثانیه نگه می‌دارد، و نیمهٔ دوم این درس به همین بستگی دارد.

این مقدارها را به خاطر بسپارید: نور در هر نانوثانیه 0.3 m و در هر میکروثانیه 300 m می‌رود. موقعیتی با دقت 3 m یعنی زمان‌سنجی با دقت 10 ns. ماهواره‌ای که ساعتش 1 میکروثانیه جلو باشد، همهٔ گیرنده‌هایی را که از آن استفاده می‌کنند 300 m در امتداد خطی به سمت خودش جابه‌جا می‌کند، و به همین دلیل ساعت ماهواره‌ها چند بار در روز از زمین تصحیح می‌شود.

هواپیما دو ارتفاع دارد. حل ماهواره‌ای ارتفاعی هندسی نسبت به بیضی‌گون مرجع می‌دهد. اما ارتفاعی که برای مقاصد ترافیک هوایی پخش می‌کند ارتفاع فشاری (بارومتریک) است: فشار هوا در دریچه‌ای روی بدنه، که از طریق «جو استاندارد بین‌المللی» به ارتفاع تبدیل می‌شود؛ این جو استاندارد در سطح دریا 1013.25 hPa و 15 درجهٔ سلسیوس و کاهشی برابر 6.5 درجه در هر کیلومتر فرض می‌کند. وقتی فشار واقعی با فشار 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. پیام موقعیت، ارتفاع فشاری را با گام‌های 25 فوتی حمل می‌کند؛ پیام سرعت، اختلاف ارتفاع فشاری و هندسی را. اگر صفحه‌گسترده دارید، رابطهٔ p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255 را وارون کنید و بررسی کنید که در 11 000 m فشار حدود 227 hPa است، کمتر از یک‌چهارم فشار سطح دریا: هوایی که هواپیمای مسافربری در آن پرواز می‌کند شما را هوشیار نگه نمی‌دارد.

حالا کل ایده را وارونه کنید. بعضی هواپیماها روی 1090 MHz بدون موقعیت ارسال می‌کنند: ترانسپوندرهای قدیمی که فقط با شناسه و ارتفاع به رادار پاسخ می‌دهند، یا هواپیماهایی که دریافت ماهواره‌ای‌شان مختل (پارازیت) شده است. شبکه‌ای از گیرنده‌ها باز هم می‌تواند با «مولتی‌لیتریشن» (چندجانبه‌سازی) جای آن‌ها را پیدا کند. فرض کنید چهار گیرنده با ساعت‌های همگام، هر کدام زمان رسیدن یک ارسال واحد را ثبت کنند. 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 همهٔ چنین نقطه‌هایی یک هذلولی‌گون با کانون‌های A و B می‌سازند. سه جفت مستقل از چهار گیرنده سه هذلولی‌گون می‌دهند که در محل هواپیما یکدیگر را قطع می‌کنند. این همان مسئلهٔ ماهواره است که جای معلوم و مجهول در آن عوض شده: آنجا یک گیرنده و چهار فرستندهٔ معلوم؛ اینجا یک فرستنده و چهار گیرندهٔ معلوم. در هر دو، چیزی که اندازه گرفته می‌شود زمان است، و 1 میکروثانیه یعنی 300 m. گیرنده‌ها ساعت‌هایشان را با دقت حدود 100 ns با همان ماهواره‌هایی همگام می‌کنند که هواپیما به کار می‌برد.

می‌توانید این کار را با صدا انجام دهید. سه نفر با کرنومتر در نقطه‌هایی اندازه‌گیری‌شده در زمین بازی می‌ایستند؛ نفر چهارم، پنهان، یک بار دست می‌زند؛ هر کدام تأخیر را ثبت می‌کند. با سرعت صوت 343 m/s، اختلاف 0.1 s یعنی 34 m، و یک نقشهٔ مقیاس‌دار با موقعیت‌های آزمایشی، یا طرحی از هذلولی‌ها، جای کسی را که دست زده پیدا می‌کند. سپس بپرسید که کرنومترها برای انجام همین کار با رادیو در فاصلهٔ 200 km به چه دقتی نیاز داشتند، و خواهید فهمید چرا شبکه به زمان اتمی نیاز دارد.

درس 3

پیام: 112 بیت، و اینکه خطاها چگونه شناسایی می‌شوند

ترانسپوندر، ADS-B را به شکل یک «اسکوییتر گستردهٔ» Mode S می‌فرستد: یک پیش‌درآمد 8 میکروثانیه‌ای، و سپس 112 بیت داده با سرعت یک بیت در هر میکروثانیه. پیش‌درآمد الگوی ثابتی از چهار پالس در 0، 1، 3.5 و 4.5 میکروثانیه است، و کارش پاسخ دادن به پرسشی است که شاید به فکرتان نرسیده باشد: در کانالی پر از نویز و پر از هواپیماهای دیگر، گیرنده از کجا می‌فهمد که یک پیام شروع شده و هر بیت کی آغاز می‌شود؟ رمزگشا پیوسته دنبال این الگو می‌گردد و وقتی آن را ببیند، هر دو را می‌داند. هر پروتکل دیجیتالی که به کار می‌برید، از Wi-Fi تا کد QR، چیزی معادل آن دارد.

فرستنده می‌تواند روشن یا خاموش باشد؛ پس چگونه 1 یا 0 می‌فرستد؟ ADS-B از «مدولاسیون موقعیت پالس» استفاده می‌کند. هر خانهٔ بیتی یک‌میکروثانیه‌ای به دو نیمه تقسیم می‌شود: پالس در نیمهٔ اول و سکوت در نیمهٔ دوم یعنی 1؛ سکوت و سپس پالس یعنی 0. همیشه دقیقاً یک پالس در هر بیت هست. فکر کنید چرا این بهتر از «پالس یعنی 1، نبودِ پالس یعنی 0» است. گیرنده هیچ‌وقت زمان‌بندی‌اش را از دست نمی‌دهد، حتی در یک رشتهٔ طولانی از صفرها، که در روش ساده از سکوت قابل تشخیص نبود. و هر بیت را با این پرسش تعیین می‌کند که کدام نیمه بلندتر بود، نه اینکه آیا پالس از یک سطح ثابت بالاتر رفته یا نه، پس سیگنال ضعیفی از 400 km به همان اندازهٔ سیگنال قوی‌ای از بالای سر قابل‌اعتماد رمزگشایی می‌شود.

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.

112 بیت به این ترتیب چیده شده‌اند، و باید بتوانید آن را از حفظ بازسازی کنید. بیت‌های 1 تا 5: قالب downlink، که برای ADS-B از ترانسپوندر برابر 17 است. بیت‌های 6 تا 8: کد قابلیت. بیت‌های 9 تا 32: نشانی 24 بیتی ICAO، شناسهٔ دائمی هواپیما که هنگام ثبت داده می‌شود؛ 2^24 = 16 777 216 نشانی وجود دارد که به صورت بلوک به کشورها اختصاص یافته‌اند، و بلوک بلژیک از 448000 تا 44FFFF در هگزادسیمال است. بیت‌های 33 تا 88: فیلد پیام 56 بیتی، که پنج بیت اولش، یعنی کد نوع، می‌گوید 51 بیت دیگر چه چیزی دارند. کدهای نوع 1 تا 4 شناسهٔ پروازی (call sign) را به شکل هشت نویسهٔ 6 بیتی حمل می‌کنند، هر کدام با 64 نماد. کدهای نوع 9 تا 18 موقعیت در هوا را حمل می‌کنند: 12 بیت ارتفاع فشاری با گام‌های 25 فوتی، یک پرچم زوج/فرد، و برای هر کدام از عرض و طول جغرافیایی 17 بیت کدشده. کد نوع 19 سرعت را به شکل مؤلفه‌های شرقی-غربی و شمالی-جنوبی سرعت زمینی، آهنگ عمودی و اختلاف ارتفاع فشاری و هندسی حمل می‌کند. بیت‌های 89 تا 112: توازن (parity) 24 بیتی. حساب را بررسی کنید: 12 بیت ارتفاع با گام 25 ft، تا 102 400 ft را پوشش می‌دهد؛ 17 بیت اگر به شکل ساده روی 180 درجهٔ عرض جغرافیایی به کار رود فقط 1.4 km دقت می‌دهد. موقعیت به لطف «گزارش فشردهٔ موقعیت» (CPR) دقیق‌تر از این است: 17 بیت موقعیت را درون یک ناحیه با دقت چند متر می‌دهند، نه اینکه کدام ناحیه، و هواپیما میان دو شبکهٔ ناحیه، زوج و فرد، جابه‌جا می‌شود. گیرنده‌ای که یکی از هر کدام را شنیده باشد ناحیه را بی‌ابهام تعیین می‌کند و سپس با پیام‌های تکی ردیابی می‌کند. دقت بیشتر از همان بیت‌ها، که با زمان خریده شده است.

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

پیام واقعی بالای این صفحه را تشریح کنید. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 برابر 28 رقم هگزادسیمال، یعنی 112 بیت است. دو رقم اول، 8D، در دودویی 1000 1101 است؛ پنج بیت اول، 10001، برابر 17 است، پس این ADS-B از یک ترانسپوندر است، و سه بیت بعدی، 101، قابلیت 5 را می‌دهند. شش رقم بعدی، 4840D6، نشانی ICAO است که جدول‌های تخصیص آن را به هلند نسبت می‌دهند. جفت رقم بعدی، 20، با 00100 شروع می‌شود، یعنی کد نوع 4، یک پیام شناسایی، و رمزگشایی نویسه‌های 6 بیتی بعدی شناسهٔ پروازی KLM1023 را می‌دهد. شش رقم آخر، 576098، توازن هستند. با یک صفحه‌گسترده یا چند خط کد می‌توانید کل رمزگشایی را انجام دهید، و هدف این درس این است که بتوانید به یک سطر هگز نگاه کنید و بگویید «یک هواپیمای KLM که پرواز 1023 را اعلام می‌کند».

توازن بیشترین فکر را می‌طلبد. بالای یک فرودگاه شلوغ، ارسال‌های هواپیماهای مختلف دائماً در گیرنده روی هم می‌افتند و پالس‌های تکی در نویز گم می‌شوند؛ رمزگشا ناگزیر گاهی بیت‌های اشتباه سرهم می‌کند. 24 بیت آخر یک «بررسی افزونگی چرخه‌ای» (CRC) هستند: 88 بیت پیام به‌عنوان یک عدد دودویی بلند در نظر گرفته می‌شوند و، در حسابی که در آن تفریق همان یای انحصاری (XOR) است، بر یک چندجمله‌ای مولد ثابت 25 بیتی تقسیم می‌شوند؛ باقی‌مانده همان CRC است. گیرنده تقسیم را روی بیت‌هایی که رمزگشایی کرده تکرار می‌کند. هر تک‌بیتِ وارونه‌شده، هر دو بیت، و هر رشتهٔ پیوسته‌ای از خطاها به طول حداکثر 24 بیت باقی‌مانده را تغییر می‌دهد و پیام رد می‌شود. برای دیدن سازوکار، یک CRC چهار بیتی را روی یک پیام 8 بیتی با دست امتحان کنید، و سپس اگر برنامه‌نویسی می‌کنید، CRC-24 واقعی را پیاده کنید و بررسی کنید که پیام نمونه از آزمون می‌گذرد و وارونه کردن هر یک بیت باعث رد شدنش می‌شود. این همان تشخیص خطاست که هر سامانهٔ امروزی انجام می‌دهد، در زمینه‌ای که یک خطای ناشناخته می‌تواند یک هواپیمای شبح را روی صفحهٔ کنترلر بگذارد.

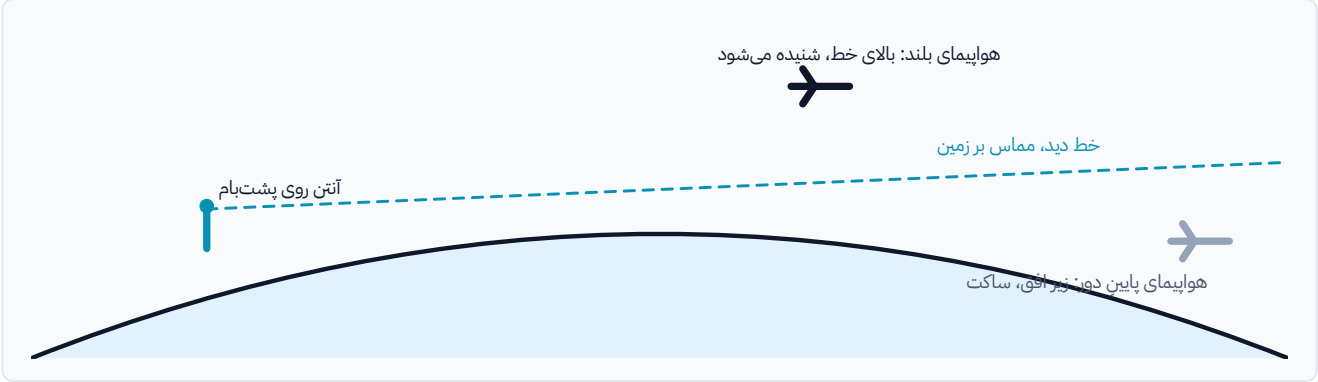
درس 4

بُرد: انحنای زمین و قانون عکس مجذور

یک گیرنده هواپیما را از چه فاصله‌ای می‌شنود؟ دو محدودیت متفاوت وجود دارد و ارزشش را دارد که آن‌ها را جدا نگه داریم. اولی هندسی است. در 1090 MHz رادیو دور زمین خم نمی‌شود؛ در خط راست حرکت می‌کند، پس گیرنده فقط هواپیماهای بالای افق خود را می‌شنود، یعنی آن‌هایی که خط راستی از آن‌ها تا آنتن از زمین رد نمی‌شود. فاصلهٔ افق را 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 و دو شعاع در نقطهٔ تماس زاویهٔ قائمه می‌سازند، پس (R + h)^2 = R^2 + d^2، که d^2 = 2Rh + h^2 را می‌دهد، و چون h در برابر R ناچیز است، d = sqrt(2Rh). با R = 6 371 km و h بر حسب متر، d (km) = 3.57 sqrt(h). جو، رادیو را کمی به پایین خم می‌کند چون ضریب شکستش با ارتفاع کم می‌شود؛ تصحیح استاندارد زمین را با شعاعی برابر چهار-سوم شعاع واقعی‌اش در نظر می‌گیرد 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
```

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



نمودار d را بر حسب h2 برای ارتفاع آنتن خودتان رسم کنید. منحنی در ابتدا تند است و بعد صاف می‌شود، و شکل پوشش هر گیرنده را توضیح می‌دهد: 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. توضیح می‌دهد چرا ارتفاع مهم‌ترین ویژگی یک گیرنده است، و چرا یک تپه، یک ساختمان، یا بال خود هواپیما وقتی دور می‌زند و دور می‌شود، می‌تواند مسیر را در یک لحظه قطع کند.

محدودیت دوم انرژی است. ترانسپوندر 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 باید آن را از مساحت کره به دست آورید نه اینکه حفظش کنید. دو برابر دورتر، یک‌چهارم توان؛ ده برابر، یک‌صدم. مهندسان این اتلاف را با دسی‌بل بیان می‌کنند، که در آن 10 dB ضریب ده در توان است و 3 dB ضریب دو، چون دسی‌بل‌ها ضرب در گسترهٔ چندین مرتبهٔ بزرگی را به جمع تبدیل می‌کنند. اتلاف مسیر در فضای آزاد میان دو آنتن ساده برابر است با:

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

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

این عدد ارزش مکث دارد: گیرنده‌ای روی پشت‌بام سیگنالی را تشخیص می‌دهد که 14.5^10 بار ضعیف‌تر از سیگنالی است که از هواپیما بیرون آمده، یک میلیونیم یک میلیونیم وات. یک گیرندهٔ آماتوری خوب تا حدود -100 dBm رمزگشایی می‌کند، پس در 400 km هنوز 9 dB حاشیه هست. به بیان دیگر، محدودیت انرژی و افق هندسی برای یک هواپیمای مسافربری در حال کروز در یک جا قرار می‌گیرند، و این عمدی است: توان ترانسپوندر و استانداردهای گیرنده طوری تعیین شده‌اند که هواپیما تا افقش شنیده شود و نه خیلی دورتر، تا کانال با ترافیک کشور همسایه پر نشود.

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

درس 5

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، و همین وسیله اگر با جریان راه‌اندازی شود موج می‌فرستد؛ آنتن‌های گیرنده و فرستنده یک چیزند که در جهت عکس کار می‌کنند. جریان القایی در تشدید بیشترین مقدار را دارد، یعنی وقتی طول رسانا به توزیع جریان در طول آن اجازه می‌دهد با نوسان موج جور شود، همان‌طور که سیمی با طول مناسب با یک نت

خاص 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، هم روی هواپیما و هم روی بیشتر گیرنده‌ها، یک تک‌قطبی ربع‌موج است: یک عنصر عمودی 6.9 سانتی‌متری روی یک صفحهٔ زمین رسانا، که 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. آنتن دست‌ساز با چند میلی‌متر خطا از تنظیم خارج می‌شود و فقط بخشی از آسمان را می‌شنود، و به همین دلیل گیرندهٔ پروژه از آنتنی که در کارخانه تنظیم شده استفاده می‌کند.

یک تک‌قطبی عمودی به سمت افق بیشترین حساسیت را دارد و در امتداد محور خودش هیچ حساسیتی ندارد؛ حساسیت آن در سه بعد شبیه یک دونات حلقه‌ای است که آنتن از سوراخش رد شده. پس گیرنده‌تان هواپیمایی را در 300 km عالی می‌شنود و هواپیمایی را که درست از بالای سر می‌گذرد چند ثانیه گم می‌کند، و می‌توانید این را ببینید. یک آنتن هم‌خط (collinear)، یعنی چند عنصر تشدیدی روی هم، دونات را پهن‌تر می‌کند و حساسیت در افق را به بهای سوراخ بالای سر افزایش می‌دهد: این بهرهٔ آنتن است که با dBi اندازه گرفته می‌شود، و از توزیع دوبارهٔ حساسیت می‌آید، هرگز از ساختن آن. و از درس 1 می‌دانیم که آنتن باید عمودی باشد، چون موج قطبش عمودی دارد.

میان آنتن و یک نقطه روی نقشه چهار مرحله هست. یک فیلتر میان‌گذر 1090 MHz را عبور می‌دهد و سیگنال‌های بسیار قوی‌تر تلفن همراه را، که چند صد مگاهرتز دورترند و در غیر این صورت همهٔ مراحل بعدی را اشباع می‌کردند، رد می‌کند. یک تقویت‌کنندهٔ کم‌نویز کنار آنتن سیگنال را پیش از کابل هزار برابر می‌کند، کابلی که در 1090 MHz در هر ده متر حدود 3 dB، یعنی نصف سیگنال، اتلاف دارد؛ اگر بعد از کابل تقویت کنید، نویز کابل را هم تقویت می‌کنید. یک رادیوی نرم‌افزاری (SDR)، یک وسیلهٔ USB بیست‌یورویی که در اصل به‌عنوان گیرندهٔ تلویزیون فروخته می‌شد، بسامد سیگنال را پایین می‌آورد و آن را دو میلیون بار در ثانیه نمونه‌برداری می‌کند و به جریانی از اعداد تبدیل می‌کند. از اینجا به بعد کار برنامه‌نویسی است: نرم‌افزار رایگان نمونه‌ها را برای یافتن 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 شناسه را بر اساس نشانی ICAO ادغام می‌کند، و وضعیت هر هواپیما را تا زمانی که پیام‌ها دیگر نرسند نگه می‌دارد، که معمولاً به این دلیل است که هواپیما زیر افق رفته.

این زنجیره را رسم کنید و کمیت هر مرحله را بنویسید: نانوولت در آنتن، میکروولت پس از تقویت‌کننده، دو میلیون نمونه در ثانیه از خروجی رادیو، چند صد قاب در ثانیه از رمزگشا، یک رکورد برای هر هواپیما از ردیاب. یک نقطه روی نقشه انتهای زنجیره‌ای است که هر حلقه‌اش ایده‌ای از این دوره است: تشدید، فیلتر کردن، تقویت، نمونه‌برداری، تطبیق الگو، رمزگشایی، بررسی خطا، تجمیع. پروژه این است که زنجیره را بسازید و دوره را در برابر آسمان آزمایش کنید: بیشترین بُرد را بر حسب ارتفاع اندازه بگیرید و با فرمول افق مقایسه کنید؛ آنتن را در داخل اتاق، کنار پنجره و روی پشت‌بام، عمودی و افقی، مقایسه کنید؛ ترافیک یک روز را ثبت کنید و شلوغ‌ترین ساعت و ارتفاع کروز معمول را پیدا کنید؛ پیام‌های خام را رمزگشایی کنید و CRC آن‌ها را با کد خودتان بررسی کنید. و سپس پرسش‌هایی را مطرح کنید که سامانه پیش می‌کشد و به آن‌ها پاسخ نمی‌دهد: پیام‌ها امضا ندارند، پس چه چیزی جلوی کسی را می‌گیرد که یک هواپیمای شبح پخش کند؛ هواپیما به ماهواره‌هایی وابسته است که می‌توان آن‌ها را مختل کرد، پس وقتی مختل می‌شوند کنترلر چه می‌بیند؛ و داده‌ها هواپیماها را شناسایی می‌کنند، که می‌توانند آدم‌ها را شناسایی کنند، پس چه کسی باید بتواند چه کسی را دنبال کند.

چالش‌ها

اول هر کدام را روی کاغذ حل کنید. بخش بررسی، پاسخ و استدلال را نشان می‌دهد.

1. 1. طول موج سیگنال 1090 MHz چقدر است، و یک آنتن ربع‌موج برای آن چه طولی دارد؟

2. 2. پیام چند برابر سریع‌تر از صداست؟ هواپیمایی در فاصلهٔ 30 km هر دو را در یک لحظه می‌فرستد؛ وقتی صدا می‌رسد، هواپیما چقدر پرواز کرده است؟

3. 3. ساعت یک گیرنده 2 میکروثانیه خطا دارد. این چه خطایی در فاصله ایجاد می‌کند، و چرا گیرندهٔ ماهواره‌ای به چهار ماهواره نیاز دارد نه سه؟

4. 4. 24 بیت نشانی چند هواپیما را می‌تواند شناسایی کند؟ یک پیام 112 بیتی با یک بیت در هر میکروثانیه چقدر طول می‌کشد، و کل ارسال همراه با پیش‌درآمدش چقدر؟

5. 5. در پیام 8D4840D6...، قالب downlink و قابلیت چیست، و نشانی ICAO کدام است؟

6. 6. یک آنتن گیرنده در ارتفاع 15 m است. افق رادیویی تا هواپیمایی در 9 000 m چقدر است، و تا هواپیمایی در 300 m؟

7. 7. چرا دو برابر شدن فاصله توان دریافتی را یک‌چهارم می‌کند؟ اتلاف مسیر در 200 km چقدر است، و در مقایسه با 145 dB در 400 km چگونه است؟

8. 8. پیش‌بینی کنید اگر آنتن افقی خوابانده شود، و اگر گیرنده از پشت‌بام به طبقهٔ همکف برده شود، بُرد چه می‌شود.

گام بعدی

آن را بسازید

همه چیز در این درس‌ها را می‌توان از کنار یک پنجره بررسی کرد. کارگاه عملی فهرست خرید (حدود 100 تا 150 یورو، یا یک Raspberry Pi که از قبل دارید)، آنتنی که باید انتخاب کنید و جایی که باید نصبش کنید، سه فرمانی که فیدر Dataero را نصب می‌کنند، و اندازه‌گیری‌هایی را به شما می‌دهد که فرمول‌ها را در برابر هواپیماهای واقعی می‌آزمایند: افق رادیویی، قانون عکس مجذور، ریتم روزانه. وقتی گیرنده‌تان به نقشه داده بدهد، هر هواپیمایی که می‌شنود برای همه رسم می‌شود، با نام ایستگاه شما روی آن.

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

پاسخ‌ها

1. 1. طول موج سیگنال 1090 MHz چقدر است، و یک آنتن ربع‌موج برای آن چه طولی دارد؟
lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. یک عنصر ربع‌موج 6.9 cm است. سرعت ثابت نور باعث می‌شود بسامد و طول موج با هم نسبت وارون داشته باشند.

2. 2. پیام چند برابر سریع‌تر از صداست؟ هواپیمایی در فاصلهٔ 30 km هر دو را در یک لحظه می‌فرستد؛ وقتی صدا می‌رسد، هواپیما چقدر پرواز کرده است؟
3.00 343 / 10^8 x = حدود 875 000 برابر. پیام در 100 میکروثانیه می‌رسد و صدا در 87 s، و در این مدت هواپیما با سرعت 250 m/s، 22 km پرواز می‌کند.

3. 3. ساعت یک گیرنده 2 میکروثانیه خطا دارد. این چه خطایی در فاصله ایجاد می‌کند، و چرا گیرندهٔ ماهواره‌ای به چهار ماهواره نیاز دارد نه سه؟
2 m/s = 600 m 10^8 x 3 x 10^-6 s. سه ماهواره فقط وقتی x، y و z را تعیین می‌کنند که ساعت کامل باشد؛ اختلاف ساعت مجهول چهارم است، پس ماهوارهٔ چهارم لازم است.

4. 4. 24 بیت نشانی چند هواپیما را می‌تواند شناسایی کند؟ یک پیام 112 بیتی با یک بیت در هر میکروثانیه چقدر طول می‌کشد، و کل ارسال همراه با پیش‌درآمدش چقدر؟
2^24 = 16 777 216. داده‌ها 112 میکروثانیه طول می‌کشند؛ با پیش‌درآمد 8 میکروثانیه‌ای، 120 میکروثانیه.

5. 5. در پیام 8D4840D6...، قالب downlink و قابلیت چیست، و نشانی ICAO کدام است؟
8D = 1000 1101. پنج بیت اول 10001 = 17: 17 DF، یعنی ADS-B از یک ترانسپوندر Mode S. سه بیت بعدی 101 = 5: 5 CA. نشانی ICAO برابر 4840D6 است که به هلند اختصاص یافته.

6. 6. یک آنتن گیرنده در ارتفاع 15 m است. افق رادیویی تا هواپیمایی در 9 000 m چقدر است، و تا هواپیمایی در 300 m؟
d = 4.12 x (sqrt(15) + sqrt(9000)) = 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km. برای 300 m: 4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km.

7. 7. چرا دو برابر شدن فاصله توان دریافتی را یک‌چهارم می‌کند؟ اتلاف مسیر در 200 km چقدر است، و در مقایسه با 145 dB در 400 km چگونه است؟
توان فرستاده‌شده روی کره‌ای به مساحت 4 pi d^2 پخش می‌شود که در فاصلهٔ دو برابر، چهار برابر بزرگ‌تر است. در 200 km: 32.4 + 60.7 + 46.0 = 139 dB، یعنی 6 dB (ضریب چهار) کمتر از 400 km.

8. 8. پیش‌بینی کنید اگر آنتن افقی خوابانده شود، و اگر گیرنده از پشت‌بام به طبقهٔ همکف برده شود، بُرد چه می‌شود.
افقی: قطبش آنتن نسبت به موج عمودی متقاطع است؛ جریان القایی به مؤلفهٔ میدان در امتداد رسانا بستگی دارد، پس خیلی کم می‌شنود. طبقهٔ همکف: جملهٔ افق 4.12 sqrt(h1) کوچک می‌شود و ساختمان‌ها خط دید را می‌بندند، پس بُرد به شدت کم می‌شود، به‌ویژه برای هواپیماهای پایین.