دوره‌ی مرجع - برای هر بزرگسال

ADS-B چیست و چگونه کار می‌کند

دوازده فصل. هیچ دانش قبلی از هوانوردی یا رادیو لازم نیست؛ ریاضیات دبیرستان برای مثال‌های حل‌شده کافی است، و می‌توان از آن‌ها گذشت بی‌آنکه رشته‌ی مطلب گم شود. زمان مطالعه حدود 50 دقیقه.

آموزش - https://radar.dataero.eu/fa/learning/course 2026-11-21

فهرست مطالب

فصل 1 مسئله: آسمانی پر از هواپیما که هیچ‌کس نمی‌تواند ببیند
فصل 2 پیش از ADS-B: یافتن هواپیماها با رادار
فصل 3 ایده: بگذاریم هواپیما خودش به ما بگوید
فصل 4 هواپیما چگونه می‌داند کجاست
فصل 5 کالبدشکافی یک پیام
فصل 6 - فیزیک موج: رادیو به‌مثابه‌ی نوری نامرئی
فصل 7 - فیزیک برد: انحنای زمین و تضعیف سیگنال
فصل 8 - فیزیک آنتن‌ها: به دام انداختن موجی 27 سانتی‌متری
فصل 9 دریافت و رمزگشایی
فصل 10 از یک گیرنده تا نقشه‌ی یک قاره
فصل 11 کاربردها، و جاهایی که کم می‌آورد
فصل 12 تاریخچه‌ای کوتاه
واژه‌نامه
گام بعدی از نظریه تا عمل: گیرنده را بسازید

فصل 1

مسئله: آسمانی پر از هواپیما که هیچ‌کس نمی‌تواند ببیند

در یک روز کاری معمولی، حدود 30 000 پرواز از فضای هوایی اروپا می‌گذرند. یک هواپیمای مسافربری در حالت کروز با سرعتی حدود 250 متر بر ثانیه، یعنی 900 km/h، حرکت می‌کند؛ دو هواپیما که به سوی هم می‌روند در هر ثانیه نیم کیلومتر به هم نزدیک‌تر می‌شوند. خلبانی که از پنجره بیرون را نگاه می‌کند تقریباً هیچ‌چیز از این را نمی‌بیند: در ارتفاع 10 000 متر، هواپیماهای دیگر نقطه‌هایی ریزند و در هر حال ابرها بیشترشان را پنهان می‌کنند. آسمان یک شبکه‌ی راه سه‌بعدی است که هیچ جاده‌ای روی آن خط‌کشی نشده، و ترافیک آن هم سریع است و هم نامرئی.

کنترل ترافیک هوایی برای این وجود دارد که این ترافیک را از هم جدا نگه دارد. قواعد در اصل ساده‌اند: در فضای هوایی کنترل‌شده، هواپیماها دست‌کم 1 000 پا (حدود 300 متر) از هم فاصله‌ی عمودی دارند، یا فاصله‌ی افقی معینی، معمولاً 5 مایل دریایی (9.3 km) در محدوده‌ی پوشش رادار و بسیار بیشتر بر فراز اقیانوس‌ها. برای اجرای این قواعد، کنترلر باید به‌طور پیوسته و قابل اتکا موقعیت هر هواپیما در بخش خود را بداند: نه جایی که یک دقیقه پیش بود، بلکه جایی که اکنون هست، ارتفاعش چقدر است و به کدام سو می‌رود. کل موضوع این دوره این است که این دانش چگونه به دست می‌آید. واژه‌ی فنی آن **مراقبت** (surveillance) است.

عددی که باید به خاطر داشت

با سرعت 900 km/h، یک هواپیما در یک دقیقه 15 km و در یک ثانیه 250 m می‌پیماید. هر روش مراقبتی که دیر به‌روز شود یا خطای بزرگی داشته باشد، کنترلر را دقیقاً در همان فاصله‌هایی که اهمیت دارند در حدس و گمان رها می‌کند.

فصل 2

پیش از ADS-B: یافتن هواپیماها با رادار

نخستین پاسخ، که در اواخر دهه‌ی 1930 پدید آمد و در جنگ جهانی دوم به بلوغ رسید، **رادار اولیه** بود. یک آنتن بزرگ چرخان پالسی کوتاه و بسیار پرقدرت از انرژی رادیویی می‌فرستد. وقتی پالس به هواپیما برخورد می‌کند، کسر بسیار کوچکی از آن بازتاب می‌شود. رادار زمان میان خروج پالس و بازگشت پژواک را اندازه می‌گیرد؛ چون رادیو با سرعت نور، 300 000 km/s، حرکت می‌کند، این زمان فاصله را به دست می‌دهد. جهتی که آنتن به آن نشانه رفته بود، سمت را می‌دهد. رادار اولیه به‌شکل شگفت‌انگیزی مستقل است: هواپیما به هیچ تجهیزاتی نیاز ندارد، و به همین دلیل هنوز در نیروهای نظامی به کار می‌رود. اما ضعف‌های واقعی دارد. پژواک یک هواپیمای دوردست بی‌نهایت ضعیف است، پس فرستنده باید عظیم باشد. پژواک هیچ‌چیز درباره‌ی هویت هواپیما یا ارتفاع آن نمی‌گوید. و چرخش کامل آنتن چند ثانیه طول می‌کشد، پس هر هواپیما فقط هر 4 تا 12 ثانیه یک بار دیده می‌شود، و در این مدت تا 3 km جابه‌جا شده است.

پاسخ دوم، **رادار مراقبت ثانویه** (SSR)، هواپیما را به یک مشارکت‌کننده تبدیل کرد. یک ایستگاه زمینی پرسشی، یک *استعلام* (interrogation)، روی 1030 MHz می‌فرستد. یک رادیوی کوچک در هواپیما، **ترنسپاندر**، پرسش را می‌شنود و روی 1090 MHz با سیگنال قوی خودش پاسخ می‌دهد. چون پاسخ ارسال می‌شود و نه بازتاب، میلیون‌ها بار قوی‌تر از پژواک رادار است، و چون یک رایانه آن را تولید می‌کند، می‌تواند اطلاعات حمل کند. در قدیمی‌ترین شکل (Mode A) پاسخ یک کد شناسایی چهاررقمی دارد که کنترلر تعیین کرده است؛ در Mode C ارتفاع هواپیما را هم در بر دارد. در دهه‌ی 1980 **Mode S** آمد («S» به معنای selective، یعنی انتخابی)، که در آن هر ترنسپاندر یک نشانی یکتای 24 بیتی دارد، می‌تواند به‌تنهایی مورد استعلام قرار گیرد و می‌تواند با پیام‌های داده‌ی 56 یا 112 بیتی پاسخ دهد. این عدد، 1090 MHz، و این واژه، Mode S، را به خاطر بسپارید: ADS-B مستقیماً بر هر دو ساخته شده است.

رادار ثانویه پیشرفت بزرگی بود، اما هنوز دو محدودیت را با پیشینیان خود شریک است. هواپیما فقط وقتی از آن پرسیده شود سخن می‌گوید، پس زمین همچنان به یک ایستگاه استعلام‌کننده در برد نیاز دارد، که اقیانوس‌ها، بیابان‌ها و رشته‌کوه‌ها را کنار می‌گذارد. و ایستگاه همچنان برای دانستن اینکه پاسخ از کدام جهت آمده به یک آنتن چرخان نیاز دارد، پس هر هواپیما همچنان فقط یک بار در هر چرخش دیده می‌شود، و صفحه‌ی کنترلر همچنان نقطه‌ای را نشان می‌دهد که هر چند ثانیه یک بار می‌پرد، نه هواپیمایی که نرم حرکت می‌کند. برای بهتر شدن، چیزی از بنیاد متفاوت لازم بود: راهی که هواپیما بی‌آنکه از آن پرسیده شود موقعیت خود را گزارش کند، و زمین اصلاً لازم نباشد چیزی را اندازه بگیرد.

فصل 3

ایده: بگذاریم هواپیما خودش به ما بگوید

تا دهه‌ی 1990، دو فناوری به بلوغ رسیده بودند که رویکردی متفاوت را ممکن می‌کردند. ناوبری ماهواره‌ای به هر هواپیمای مجهز، دانشی دقیق از موقعیت خودش می‌داد، بسیار بهتر از آنچه هر راداری از زمین بتواند اندازه بگیرد. و ترنسپاندر Mode S از پیش رادیویی فراهم کرده بود که می‌توانست پیام‌های داده را روی 1090 MHz بفرستد. این دو را کنار هم بگذارید و منطق آن مقاومت‌ناپذیر است: به‌جای اینکه زمین برای اندازه‌گیری موقعیت هواپیما تقلا کند، بگذاریم هواپیما، که از قبل می‌داند، به‌سادگی آن را در فواصل منظم به همه بگوید. این ADS-B است، و چهار واژه‌ی نام آن توصیفی دقیق از آن است.

خودکار (automatic) است: هیچ‌چیز ارسال را آغاز نمی‌کند. ترنسپاندر طبق برنامه‌ی خودش، حدود دو بار در ثانیه، می‌فرستد، چه ایستگاه زمینی در برد باشد چه نباشد و چه خلبان کاری بکند چه نکند؛ در واقع خلبان در حین پرواز نمی‌تواند آن را متوقف کند مگر با خاموش کردن ترنسپاندر، که ممنوع است. **وابسته** (dependent) است: هر جزء پیام از تجهیزات خود هواپیما می‌آید، موقعیت از گیرنده‌ی ماهواره‌ای و ارتفاع از ارتفاع‌سنج فشاری آن، و زمین هیچ‌چیز اندازه نمی‌گیرد؛ به آنچه به آن گفته می‌شود اعتماد می‌کند. **مراقبت** (surveillance) است: هدفش این است که دیگران بدانند هواپیما کجاست، برای کنترل ترافیک هوایی و برای هواپیماهای

نزدیک، و از ناوبری، که یعنی خود هواپیما بداند کجاست، و از ارتباطات، که یعنی گفت‌وگو با خلبان، متمایز است. و **پخش همگانی** (broadcast) است: پیام هیچ گیرنده‌ی مشخص، هیچ تأیید دریافت و هیچ رمزنگاری‌ای ندارد، و هر کسی با یک گیرنده در برد، دقیقاً همان چیز را می‌شنود، چه یک مرکز کنترل باشد، چه یک هواپیمای مسافربری دیگر، چه یک مدرسه.

«وابسته» واژه‌ای است که مهندسان را نگران می‌کند و بیش از همه ارزش توضیح دارد. رادار یک اندازه‌گیری مستقل انجام می‌دهد: اگر ابزارهای هواپیما اشتباه کنند، برای رادار مهم نیست. ADS-B هر خطای سامانه‌ی ناوبری خود هواپیما را به ارث می‌برد، و اگر آن سامانه فریب بخورد یا از کار بیفتد، موقعیت پخش‌شده با همان اطمینان نادرست خواهد بود. به همین دلیل هر پیام ADS-B، در کنار موقعیت، اعلامی از میزان اعتماد هواپیما به موقعیت خودش را حمل می‌کند (رده‌های یکپارچگی و دقت که در فصل 5 با آن‌ها آشنا می‌شویم)، و به همین دلیل رادار خاموش نشده است.

«پخش همگانی» واژه‌ای است که این دوره را ممکن می‌کند. چون پیام‌ها به‌صورت آشکار برای همه فرستاده می‌شوند، نه‌تنها کنترل ترافیک هوایی بلکه هر گیرنده‌ای که روی 1090 MHz تنظیم شده باشد آن‌ها را می‌شنود، از جمله گیرنده‌ای که شاید شما روی پشت‌بام یک مدرسه بگذارید. همین ویژگی سرچشمه‌ی محدودیت اصلی سامانه نیز هست، که در فصل 11 به آن می‌پردازیم: پیامی که هر کسی می‌تواند بخواند، پیامی است که هر کسی می‌تواند جعل کند.

فصل 4

هواپیما چگونه می‌داند کجاست

همه‌چیز در ADS-B بر این استوار است که هواپیما موقعیت خودش را بداند، پس این فصل درباره‌ی ناوبری ماهواره‌ای است. اصطلاح کلی آن **GNSS** است، Global Navigation Satellite System (سامانه‌ی جهانی ناوبری ماهواره‌ای)؛ GPS آمریکایی شناخته‌شده‌ترین است، و Galileo اروپا، GLONASS روسیه و BeiDou چین بر همان اصل کار می‌کنند. هر سامانه یک منظومه از حدود 24 تا 30 ماهواره است که در ارتفاع تقریبی 20 000 km، بسیار بالاتر از هواپیما، در مدارند و هر کدام یک ساعت اتمی با دقت چند میلیاردم ثانیه حمل می‌کنند. هر ماهواره پیوسته سیگنالی رادیویی می‌فرستد که در عمل می‌گوید: «این ماهواره‌ی شماره‌ی N است، موقعیت من فلان است، و زمانی که این را فرستادم دقیقاً T است».

گیرنده‌ی هواپیما این سیگنال را کمی دیرتر می‌شنود، زیرا رادیو برای سفر زمان لازم دارد: با سرعت 300 000 km/s، پیمودن 20 000 km از ماهواره حدود 67 هزارم ثانیه طول می‌کشد. گیرنده زمان ثبت‌شده در پیام را با زمان رسیدن مقایسه می‌کند. این اختلاف، ضرب در سرعت نور، فاصله تا آن ماهواره است. یک فاصله، گیرنده را جایی روی کره‌ای به دور آن ماهواره قرار می‌دهد. دو کره در یک دایره یکدیگر را قطع می‌کنند؛ سه کره در دو نقطه، که یکی از آن‌ها معمولاً بی‌معناست (در اعماق زمین یا دور در فضا) و کنار گذاشته می‌شود. پس سه ماهواره کافی می‌بود، اگر گیرنده ساعتی بی‌نقص داشت.

ندارد. یک ساعت اتمی ده‌ها هزار یورو قیمت دارد و جا هم نمی‌شود؛ گیرنده یک ساعت کوارتز ارزان دارد که ممکن است بسیار بیشتر از دقت زمانی لازم خطا داشته باشد. بخش زیبای ماجرا اینجاست. گیرنده خطای ساعت خودش را مجهول چهارمی در کنار سه مختصات موقعیتش در نظر می‌گیرد، و به ماهواره‌ی چهارمی گوش می‌دهد. چهار معادله، چهار مجهول: گیرنده موقعیت خود را حل می‌کند و به‌عنوان محصول جانبی، ساعت خودش را تا حد چند ده نانوثانیه تصحیح می‌کند. به همین دلیل یک گیرنده‌ی ماهواره‌ای دست‌کم به چهار ماهواره‌ی در دید نیاز دارد، و به همین دلیل هر گیرنده‌ی GNSS، به‌طور ضمنی، یکی از دقیق‌ترین ساعت‌های ساختمان نیز هست.

ارزش دارد روی بزرگی اعداد درنگ کنیم، زیرا نشان می‌دهند که ناوبری ماهواره‌ای در واقع تمرینی در زمان‌سنجی است و هندسه در درجه‌ی دوم قرار دارد. نور در یک نانوثانیه 30 سانتی‌متر و در یک میکروثانیه 300 متر می‌پیماید، پس خطای زمانی یک میلیونیم ثانیه به خطای موقعیت 300 متری تبدیل می‌شود، و دقت چندمتری یک گیرنده‌ی امروزی با زمان‌سنجی در حد حدود ده نانوثانیه متناظر است. یک نمونه‌ی مشخص را در نظر بگیرید. ماهواره‌ای روی سیگنالی زمان 12:00:00.000 000 000 را ثبت می‌کند؛ گیرنده‌ی

هواپیما آن را در 12:00:00.070 000 000 می‌شنود. زمان سفر 0.070 s است، پس فاصله 0.070 x 300 000 km/s = 21 000 km است. اگر ساعت خود گیرنده فقط یک میکروثانیه جلو بود، 21 000.3 km محاسبه می‌کرد، 300 متر بیش از اندازه، و همین خطا به فاصله‌ی همه‌ی ماهواره‌های دیگر هم راه می‌یافت. همین خطای مشترک دقیقاً چیزی است که ماهواره‌ی چهارم آشکار و حذف می‌کند.

دو ارتفاع، نه یکی

ماهواره‌ها ارتفاعی نسبت به سطح ریاضی زمین می‌دهند، یعنی ارتفاع *هندسی*. اما ارتفاعی که هواپیما برای مقاصد ترافیک هوایی پخش می‌کند این نیست. بلکه **ارتفاع فشاری** است، که از فشار هوای بیرون هواپیما به دست می‌آید و با روزنه‌ی کوچکی در بدنه به نام درگاه فشار ایستا (static port) اندازه گرفته می‌شود. فشار هوا به شیوه‌ای شناخته‌شده با ارتفاع کاهش می‌یابد (نزدیک زمین تقریباً 1 hPa به ازای هر 8 متر، و در ارتفاعات بالاتر کندتر)، و همه‌ی ارتفاع‌سنج‌های جهان فشار را با استفاده از همان جو استاندارد، با مرجع 1013.25 hPa در سطح دریا، به ارتفاع تبدیل می‌کنند. در روزی با فشار غیرعادی، ارتفاع فشاری همه‌ی هواپیماها به یک اندازه خطا دارد، و نکته دقیقاً همین است: آنچه برای جداسازی اهمیت دارد ارتفاع واقعی از سطح دریا نیست، بلکه این است که دو هواپیما که هر دو «سطح پرواز 350» را نشان می‌دهند واقعاً 300 متر با هواپیمایی که «سطح پرواز 340» را نشان می‌دهد فاصله داشته باشند. ADS-B ارتفاع فشاری را در پیام‌های موقعیت خود با گام‌های 25 پایی (7.6 m) پخش می‌کند، و جداگانه اختلاف آن با ارتفاع ماهواره‌ای را پخش می‌کند، تا گیرنده بتواند هر دو را به دست آورد.

فصل 5

کالبدشکافی یک پیام

پیام ADS-B که هواپیماهای مسافربری در سراسر جهان به کار می‌برند، یک ارسال Mode S به نام **اسکوییتر گسترده** (extended squitter) است؛ «squitter» اصطلاح قدیمی رادار برای ارسالی است که خودبه‌خود و نه در پاسخ فرستاده می‌شود، و «گسترده» چون با 112 بیت دو برابر طول پاسخ اولیه‌ی Mode S است. مهندسان برای «اسکوییتر گسترده‌ی 1090 MHz» می‌نویسند «1090ES». هر ارسال در مجموع 120 میکروثانیه طول می‌کشد: یک *پیش‌درآمد* (preamble) 8 میکروثانیه‌ای، یعنی الگوی ثابتی از چهار پالس که به گیرنده امکان می‌دهد آغاز پیام را تشخیص دهد و ساعت خود را همگام کند، و پس از آن 112 بیت داده با سرعت یک بیت در هر میکروثانیه.

یک بیت چگونه فرستاده می‌شود: مدولاسیون موقعیت پالس

هر خانه‌ی بیت یک‌میکروثانیه‌ای به دو نیمه تقسیم می‌شود. پالسی از انرژی رادیویی در نیمه‌ی اول و سکوت در نیمه‌ی دوم یعنی 1؛ سکوت و سپس پالس یعنی 0. بنابراین، داده هر چه باشد، برای هر بیت دقیقاً یک پالس وجود دارد، و گیرنده فقط باید تشخیص دهد کدام نیمه‌ی هر خانه بلندتر بوده است. این طرح، یعنی مدولاسیون موقعیت پالس، در برابر انواع نویز و محوشدگی‌ای که سیگنال در مسیر خود از ترنسپاندر تا یک آنتن دوردست متحمل می‌شود مقاوم است، و رمزگشایی آن ارزان است.

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



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

112 بیت

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

پنج بیت نخست، یعنی قالب downlink، می‌گویند این چه نوع پیام Mode S است؛ مقدار 17 یعنی «ADS-B از یک ترنسپاندر Mode S». **نشانی ICAO** با 24 بیت، هویت دائمی هواپیماست که هنگام ثبت آن تعیین می‌شود: 2 به توان 24، یعنی 16 777 216 نشانی ممکن وجود دارد که ICAO، نهاد هوانوردی کشوری سازمان ملل، آن‌ها را در قالب بلوک‌هایی به کشورها اختصاص می‌دهد. برای نمونه، هواپیماهای بلژیکی نشانی‌هایی از 448000 تا 44FFFF در مبنای شانزده دارند. برخلاف کد چهاررقمی Mode A قدیمی، این نشانی هرگز تغییر نمی‌کند و هرگز مشترک نیست، پس گیرنده از همان نخستین پیام مطمئن است که صدای کدام هواپیما را می‌شنود.

فیلد 56 بیتی **ME** محتوای واقعی است، و پنج بیت نخست آن، یعنی کد *نوع* (type code)، می‌گویند بقیه چه معنایی دارد. کدهای نوع 1 تا 4 شناسه‌ی رادیویی هواپیما، مانند BEL1234 یا RYR7KL، را به‌صورت هشت نویسه‌ی شش‌بیتی حمل می‌کنند. کدهای 9 تا 18 موقعیت هوایی را همراه با ارتفاع فشاری حمل می‌کنند؛ 20 تا 22 همان را با ارتفاع ماهواره‌ای. کد 19 سرعت را حمل می‌کند: سرعت زمینی تجزیه‌شده به مؤلفه‌های شرقی-غربی و شمالی-جنوبی، نرخ عمودی، و اختلاف میان ارتفاع فشاری و ماهواره‌ای. کدهای 28، 29 و 31 وضعیت را حمل می‌کنند: کدهای اضطراری، ارتفاع انتخاب‌شده، و رده‌های یکپارچگی و دقت که می‌گویند تا چه حد می‌توان به موقعیت پخش‌شده اعتماد کرد (برای نمونه یک «NIC» برابر 8 تضمین می‌کند که موقعیت واقعی، با احتمال بالا، در فاصله‌ی 185 m از موقعیت گزارش‌شده باشد).

24 بیت پایانی یک **بررسی افزونگی چرخه‌ای** (CRC) است، عددی که از 88 بیت پیشین با یک تقسیم چندجمله‌ای ثابت محاسبه می‌شود. گیرنده همان محاسبه را روی بیت‌هایی که رمزگشایی کرده تکرار می‌کند؛ اگر نتیجه مطابقت نداشته باشد، دست‌کم یک بیت در مسیر خراب شده و پیام کنار گذاشته می‌شود. از آنجا که یک پالس یک‌میکروثانیه‌ای به‌آسانی ممکن است در نویز یا در پیام هم‌پوشان هواپیمایی دیگر گم شود، همین بررسی است که موقعیت‌های مخدوش را از صفحه‌ی کنترلر دور نگه می‌دارد. یک پیام واقعی، آن‌گونه که گیرنده ثبتش می‌کند، چنین است:

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

8D: قالب downlink 17، قابلیت 5. 4840D6: نشانی ICAO، یک هواپیمای هلندی. 20...: کد نوع 4، یک پیام شناسایی، که به شناسه‌ی رادیویی KLM1023 رمزگشایی می‌شود. 576098: بررسی خطا.

جا دادن زمین در 34 بیت

یک پیام موقعیت فقط 17 بیت برای عرض جغرافیایی و 17 بیت برای طول جغرافیایی دارد. یعنی 131 072 گام در کل کره‌ی زمین، هر کدام حدود 300 m در استوا: اصلاً کافی نیست. ADS-B این مشکل را با **گزارش موقعیت فشرده** (CPR) حل می‌کند. زمین به منطقه‌هایی تقسیم می‌شود؛ 17 بیت موقعیتی بسیار دقیق (تا حدود 5 m) درون یک منطقه می‌دهند، اما نمی‌گویند کدام منطقه. هواپیما به‌نوبت از دو شبکه‌ی منطقه‌ای اندکی متفاوت استفاده می‌کند، پیام‌های «زوج» و «فرد»، و گیرنده‌ای که یکی از هر کدام را شنیده باشد می‌تواند منطقه را بی‌ابهام تعیین کند. پس از آن، یک پیام برای دنبال کردن هواپیما کافی است، زیرا به‌سختی ممکن است در نیم ثانیه به منطقه‌ی دیگری پریده باشد. ترفندی هوشمندانه است که دقت مفید را بی‌هیچ هزینه‌ای در بیت‌ها دو برابر می‌کند.

هر چند وقت یک بار

یک ترنسپاندر در حال پرواز هر ثانیه دو بار پیام موقعیت، هر ثانیه دو بار پیام سرعت و هر پنج ثانیه یک بار شناسه‌ی رادیویی خود را می‌فرستد، به‌علاوه‌ی پیام‌های وضعیت در فواصل طولانی‌تر، یعنی در مجموع حدود چهار تا پنج اسکوییتر گسترده در ثانیه. هر کدام 120 میکروثانیه طول می‌کشد؛ ترنسپاندر در واقع کمتر از یک‌هزارم زمان را صرف ارسال ADS-B می‌کند. در باقی ثانیه، به استعلام‌های رادار روی 1030 MHz و پرسش‌های سامانه‌ی پیشگیری از برخورد هواپیماهای دیگر گوش می‌دهد و به آن‌ها پاسخ می‌دهد.

فصل 6 - فیزیک

موج: رادیو به‌مثابه‌ی نوری نامرئی

پیام به‌صورت یک **موج رادیویی** هواپیما را ترک می‌کند، و سودمندترین ایده‌ی این دوره این است که موج رادیویی و پرتو نور یک چیزند. هر دو امواج الکترومغناطیسی‌اند: الگویی از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی که با هم نوسان می‌کنند و با سرعت نور، c، در فضا حرکت می‌کنند، یعنی 299 792 458 متر بر ثانیه، یا تقریباً 300 000 km/s. آنچه موج رادیویی را از نور سبز، از پرتوهای X در بیمارستان یا از امواج ریزموج در اجاق آشپزخانه متمایز می‌کند، فقط سرعت نوسان میدان‌هاست: **بسامد**، f، که با هرتز (نوسان در ثانیه) اندازه گرفته می‌شود.

چون موج با سرعت ثابتی حرکت می‌کند، بسامد فاصله‌ی میان یک قله تا قله‌ی بعدی را تعیین می‌کند، یعنی **طول موج**، lambda. موج در یک ثانیه c متر می‌پیماید و f نوسان را کامل می‌کند، پس هر نوسان c / f متر را اشغال می‌کند:

```
c = f x lambda
```

برای ADS-B: lambda = 300 000 000 / 1 090 000 000 = 0.275 m. 27.5 از هم فاصله cm قله‌های موج میان هواپیما و آنتن شما دارند، تقریباً به اندازه‌ی طول یک خط‌کش مدرسه.

موج	بسامد	طول موج	توضیح
رادیوی FM	100 MHz	3 m	آنتن خودروها کسری از این است
ADS-B / Mode S	1 090 MHz	27.5 cm	پاسخ ترنسپاندرهای رادار هم از آن استفاده می‌کنند
تلفن همراه (باند 4G)	1 800 MHz	17 cm	همسایه‌ای نزدیک در طیف
Wi-Fi، اجاق ریزموج	2 450 MHz	12 cm	همان بسامد، با توانی بسیار متفاوت
نور سبز مرئی	560 000 000 MHz	0.000 54 mm	بسامدی نیم میلیون بار بالاتر

دو پیامد برای همه‌ی آنچه در ادامه می‌آید اهمیت دارد. نخست، چون موج نور است، در خط راست حرکت می‌کند مگر اینکه چیزی آن را خم یا مسدود کند، و از درون زمین نمی‌گذرد. این برد سامانه را تعیین می‌کند، که موضوع فصل 7 است. دوم، چون طول موج آن 27.5 cm است، سازه‌های فلزی که بیشترین برهم‌کنش را با آن دارند، یعنی آنتن‌ها، در همین حدود اندازه‌اند، که موضوع فصل 8 است.

چرا رادیو صوت نیست

رایج‌ترین سردرگمی، در بزرگسالان به همان اندازه‌ی کودکان، میان رادیو و صوت است، احتمالاً چون «رادیو» جعبه‌ای است که صدا تولید می‌کند. این دو پدیده‌هایی بی‌ارتباط‌اند. صوت یک موج فشاری در هواست، زنجیره‌ای از مولکول‌ها که همسایگان خود را هل می‌دهند؛ برای سفر به یک ماده نیاز دارد، با سرعت 340 m/s حرکت می‌کند و نمی‌تواند از خلأ بگذرد. رادیو به هیچ‌چیز نیاز ندارد: از

خلأ میان ماهواره و هواپیما می‌گذرد و نزدیک به یک میلیون بار سریع‌تر حرکت می‌کند. صدای موتور هواپیما و پیام ADS-B آن در یک لحظه آن را ترک می‌کنند؛ پیام در 67 میکروثانیه به گیرنده‌ای در 20 km دورتر می‌رسد، و صدا یک دقیقه‌ی تمام بعد.

چرا 1090 MHz

این بسامد یک میراث است. توافق‌های بین‌المللی در دهه‌ی 1950 باند 960 تا 1215 MHz را برای رادیوناوبری هوانوردی کنار گذاشتند، و 1090 MHz بسامد پاسخ ترنسپاندرهای رادار ثانویه شد. وقتی ADS-B طراحی شد، استفاده‌ی دوباره از ترنسپاندری که از پیش روی هر هواپیمای مسافربری نصب بود بسیار ارزان‌تر از نصب یک رادیوی تازه بود، پس ADS-B به‌سادگی یکی دیگر از چیزهایی شد که ترنسپاندر Mode S روی 1090 MHz می‌گوید. در ایالات متحده، هواپیماهای کوچک‌تری که زیر حدود 5 500 m پرواز می‌کنند ممکن است به‌جای آن از سامانه‌ی دومی، UAT روی 978 MHz، استفاده کنند، و به همین دلیل گیرنده‌های آنجا اغلب به هر دو گوش می‌دهند.

فصل 7 - فیزیک

برد: انحنای زمین و تضعیف سیگنال

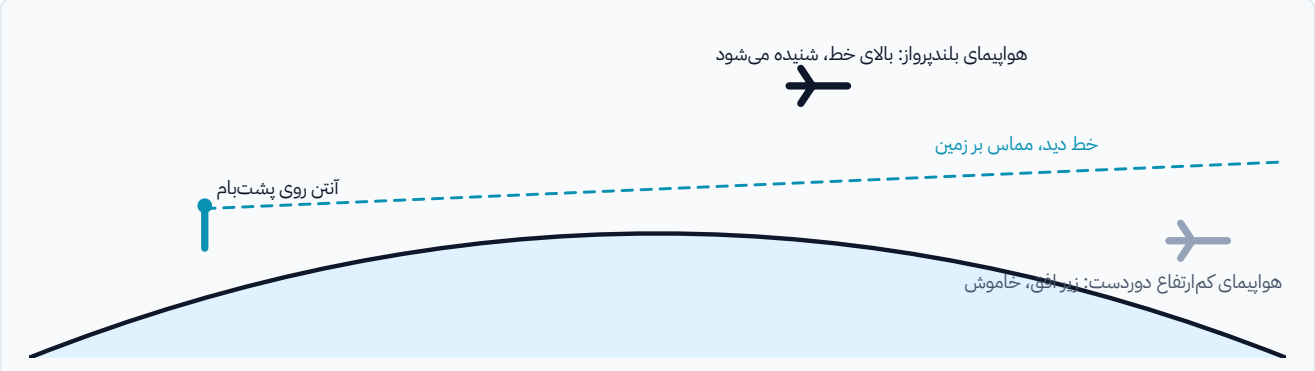
یک ترنسپاندر با توان اوج چند صد وات ارسال می‌کند. چنین سیگنالی را از چه فاصله‌ای می‌توان شنید؟ دو چیز کاملاً متفاوت آن را محدود می‌کنند، و ارزش دارد آن‌ها را از هم جدا نگه داریم: هندسه، که لبه‌ای سخت تعیین می‌کند، و توان، که لبه‌ای نرم.

افق رادیویی

در 1090 MHz، رادیو مانند نور رفتار می‌کند: در خط راست حرکت می‌کند و به دور زمین خم نمی‌شود. بنابراین یک آنتن زمینی فقط تا زمانی می‌تواند هواپیما را بشنود که میان آن‌ها خطی راست وجود داشته باشد که از زمین نگذرد. برای ناظری در سطح زمین، افق جایی است که این خط درست مماس بر زمین می‌شود. هر چه هواپیما بالاتر باشد، این نقطه‌ی تماس دورتر است؛ هر چه آنتن بالاتر باشد، باز هم دورتر. هندسه‌ی خط مماس بر یک کره نتیجه‌ای ساده می‌دهد: فاصله تا افق بر حسب کیلومتر تقریباً 3.57 برابر جذر ارتفاع بر حسب متر است. جو، رادیو را اندکی به سمت پایین خم می‌کند، که افق را حدود 15 درصد گسترش می‌دهد، پس مهندسان به‌جای آن از 4.12 استفاده می‌کنند:

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

همان پشت‌بام: 4.12 m، هواپیما در 1 000 11 m: 4.12 x (104.9 + 4.5) = 451 km. آنتن روی پشت‌بامی به ارتفاع 20 m، هواپیما در 1 000 دورتر: اصلاً شنیده نمی‌شود، مگر اینکه زمین میان آن‌ها هموار و بی‌مانع باشد km هواپیمایی روی زمین در 15 x (31.6 + 4.5) = 149 km.



این، شکل ویژه‌ی پوشش یک گیرنده را توضیح می‌دهد: دایره‌ای به شعاع 400 km یا بیشتر برای ترافیک بلندپرواز، که برای هواپیماهای در حال نزدیک شدن به فرود به چند ده کیلومتر کوچک می‌شود، و برای هواپیماهای روی زمین تقریباً هیچ، جز در فرودگاه همسایه. همچنین توضیح می‌دهد که چرا ارتفاع گیرنده بسیار بیشتر از کیفیت آن اهمیت دارد، و چرا یک تپه، یک ساختمان بلند یا حتی بال خود هواپیما، وقتی از شما دور می‌چرخد، می‌تواند سیگنال را در لحظه قطع کند.

قانون عکس مجذور

درون افق، سیگنال با فاصله ضعیف می‌شود. آنتن ترنسپاندر در همه‌ی جهت‌های افقی تابش می‌کند، پس توانش روی کره‌ای که مدام بزرگ‌تر می‌شود پخش می‌شود. مساحت کره با مجذور شعاع آن افزایش می‌یابد، پس توانی که به آنتنی با اندازه‌ی ثابت می‌رسد با مجذور فاصله کاهش می‌یابد: دو برابر دورتر، یک‌چهارم توان؛ ده برابر دورتر، یک‌صدم. مهندسان این را به‌صورت *افت مسیر* بر حسب دسی‌بل بیان می‌کنند، و برای 1090 MHz در 400 km به حدود 145 dB می‌رسد، یعنی توان دریافتی حدود 10 به توان 14.5 بار کمتر از توان ارسالی است. یک پالس 250 واتی به‌صورت تقریباً یک‌دهم یک‌میلیاردم میلی‌وات می‌رسد. یک گیرنده‌ی خوب می‌تواند آن را، به‌زحمت، آشکار کند، و به همین دلیل افق هندسی و حد توان اتفاقاً در چند صد کیلومتر بر هم منطبق می‌شوند: سامانه این‌گونه طراحی شده است.

این دو حد به شیوه‌ای با هم برهم‌کنش دارند که ارزش فهمیدن دارد. درون افق، سیگنال قوی هواپیمایی نزدیک و سیگنال ضعیف هواپیمایی دوردست هر دو بی‌نقص رمزگشایی می‌شوند، زیرا طرح موقعیت پالس فصل 5 فقط می‌پرسد کدام نیمه‌ی هر خانه‌ی بیت بلندتر بوده، نه اینکه چقدر بلند. سیگنال با دور شدن هواپیما به‌تدریج از کارایی نمی‌افتد؛ رمزگشایی‌پذیر می‌ماند تا اینکه جایی نزدیک افق، یا هندسه آن را قطع کند یا نویز درون گیرنده سرانجام آن را غرق کند، و رد هواپیما متوقف می‌شود. به همین دلیل نقشه‌های پوشش لبه‌های تیز دارند، و دورترین هواپیماهایی که یک گیرنده می‌شنود تقریباً همیشه بلندپروازترین‌ها هستند.

فصل 8 - فیزیک

آنتن‌ها: به دام انداختن موجی 27 سانتی‌متری

آنتن قطعه‌ای رسانا است که چنان شکل داده شده که موج الکترومغناطیسی گذرا، الکترون‌های درون آن را هم‌گام به حرکت درمی‌آورد و جریان متناوب بسیار کوچکی پدید می‌آورد که گیرنده می‌تواند تقویتش کند. در فرستنده عکس این اتفاق می‌افتد: جریان متناوبی در آنتن هواپیما موج را به راه می‌اندازد. بازده این تبادل به اندازه‌ی رسانا نسبت به طول موج بستگی دارد. یک سیم راست وقتی بیشترین پاسخ را می‌دهد، یعنی *تشدید* می‌کند، که طولش نصف طول موج باشد، تا جریانی که در طول آن رفت‌وبرگشت می‌کند دقیقاً با نوسان موج جور شود، مانند تابی که با ریتم طبیعی خودش هل داده شود. برای 1090 MHz، نصف طول موج 13.75 cm است.

رایج‌ترین شکل عملی، **تک‌قطبی یک‌چهارم موج** است: میله‌ای عمودی به طول یک‌چهارم طول موج، 6.9 cm، که روی سطحی رسانا، یعنی *صفحه‌ی زمین* (ground plane)، ایستاده است. صفحه‌ی زمین مانند آینه عمل می‌کند، پس میله و بازتابش با هم مانند یک آنتن نیم‌موج رفتار می‌کنند. به همین دلیل آنتن ADS-B روی هواپیما تیغه‌ای کوتاه به بلندی چند سانتی‌متر روی بدنه است، که خود بدنه صفحه‌ی زمین است، و به همین دلیل آنتن یک علاقه‌مند سیم کوتاهی روی یک درپوش حلبی است. سیمی با طول نادرست هم کار می‌کند، اما بسیار ضعیف‌تر: «گوش فلزی» کوک‌شده است.

سه ویژگی دیگر آنتن از فیزیک نتیجه می‌شود و هر کدام پیامدی دیدنی دارد. نخست **قطبش** است. میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی در جهتی معین و عمود بر جهت حرکتش نوسان می‌کند، و آنتن فقط به مؤلفه‌ای از میدان که در امتداد طول خودش است پاسخ می‌دهد. آنتن‌های هواپیما به‌صورت عمودی نصب می‌شوند، پس موج ADS-B با قطبش عمودی می‌رسد، و آنتن گیرنده هم باید عمودی باشد؛ اگر به پهلو خوابانده شود تقریباً هیچ‌چیز نمی‌شنود، همان‌طور که موجی که با تکان دادن طناب به بالا و پایین ساخته شده با یک شکاف افقی متوقف می‌شود. دوم **الگوی تابش** است. یک آنتن عمودی به سمت افق بیشترین حساسیت را

دارد و در امتداد محور خودش هیچ حساسیتی ندارد، به‌طوری که حساسیت آن در سه بعد شکل یک دونات حلقه‌ای دارد که آنتن از سوراخ آن گذشته است. بنابراین گیرنده‌ها معمولاً هواپیماهای 300 km دورتر را بی‌دردسر می‌شنوند و هواپیمایی را که درست از بالای سرشان می‌گذرد برای چند ثانیه از دست می‌دهند، چیزی که ارزش دارد روی هر نقشه‌ی زنده‌ای دنبالش باشید. چیدن چند عنصر تشدیدی روی هم، دونات را تخت‌تر می‌کند و حساسیت را به سمت افق، جایی که هواپیماهای دوردست هستند، متمرکز می‌کند، به بهای از دست رفتن حساسیت در بالای سر؛ منظور از **بهره‌ی** (gain) آنتن همین است، و همیشه بازتوزیع حساسیت است، هرگز آفرینش آن.

سومی به آنچه میان آنتن و گیرنده قرار دارد مربوط است. آنتن نه‌تنها 1090 MHz بلکه هر سیگنالی در اطراف را دریافت می‌کند، از جمله ارسال‌های تلفن همراه در فاصله‌ی چند صد مگاهرتزی که بسیار قوی‌ترند، پس فیلتری که فقط باند هوانوردی را عبور می‌دهد در ابتدا قرار می‌گیرد. سپس سیگنال باید از کابلی پایین برود، و در 1090 MHz یک کابل هم‌محور در هر ده متر تقریباً نیمی از سیگنال را از دست می‌دهد؛ چاره، یک تقویت‌کننده‌ی کم‌نویز در کنار آنتن و پیش از کابل است، تا سیگنال آن‌قدر قوی باشد که از این سفر جان سالم به در ببرد، نه در کنار گیرنده، جایی که تقویت کردن، نویز کابل را هم همراه با آنچه از سیگنال مانده تقویت می‌کند. این‌ها جزئیات‌اند، اما همان جزئیاتی که تعیین می‌کنند گیرنده‌ای روی پشت‌بام یک مدرسه هواپیماها را در افق می‌شنود یا فقط هواپیماهای نزدیک را.

فصل 9

دریافت و رمزگشایی

میان آنتن و یک نقطه روی نقشه، زنجیره‌ای از پنج مرحله وجود دارد. آنتن موج گذرا را به جریانی متناوب در حد چند میکروولت تبدیل می‌کند. یک فیلتر و یک تقویت‌کننده‌ی کم‌نویز باند 1090 MHz را نگه می‌دارند، هر چیز دیگری را رد می‌کنند و سیگنال را هزار برابر تقویت می‌کنند. یک رادیوی نرم‌افزارمحور روی بسامد تنظیم می‌شود و از سیگنال دو میلیون بار در ثانیه نمونه می‌گیرد و آن را به جریانی از اعداد تبدیل می‌کند. یک رمزگشا در این جریان به دنبال الگوی پیش‌درآمد می‌گردد، 112 بیت را می‌خواند، توازن (parity) را بررسی می‌کند و فیلدها را رمزگشایی می‌کند. و یک ردیاب، پیام‌های هر هواپیما را در یک رکورد واحد و پیوسته به‌روزشونده گرد می‌آورد: یک موقعیت، یک مسیر، یک برچسب.

مرحله‌ی شگفت‌انگیز، مرحله‌ی سوم است. تا حدود سال 2010، رمزگشایی 1090 MHz به سخت‌افزاری اختصاصی با قیمت هزاران یورو نیاز داشت. سپس علاقه‌مندان کشف کردند که یک گیرنده‌ی تلویزیونی USB بیست‌یورویی تراشه‌ای دارد که می‌توان به آن گفت روی هر بسامدی تنظیم شود و سیگنال خام را به رایانه بدهد. این **رادیوی نرم‌افزارمحور** (SDR) مسئله‌ی رادیویی را به یک مسئله‌ی برنامه‌نویسی تبدیل می‌کند: یک لپ‌تاپ یا یک Raspberry Pi جریانی از دو میلیون عدد در ثانیه دریافت می‌کند که قدرت سیگنال را توصیف می‌کنند، و نرم‌افزاری رایگان به دنبال الگوی پیش‌درآمد می‌گردد، اندازه می‌گیرد کدام نیمه‌ی هر خانه‌ی میکروثانیه‌ای بلندتر است، 112 بیت را سرهم می‌کند، CRC را محاسبه می‌کند و فیلدها را چاپ می‌کند. پروژه‌ی ساخت گیرنده در بسته‌ی دبیرستان دقیقاً همین زنجیره است، و یک مدرسه می‌تواند آن را با کمتر از 100 یورو بسازد.

مرحله‌ی ردیاب جایی است که جریان پیام‌ها به دانش تبدیل می‌شود. به یاد داشته باشید که یک پیام موقعیت به‌تنهایی مبهم است تا زمانی که یک پیام زوج و یک پیام فرد با هم جفت شوند. سرعت جدا از موقعیت می‌رسد، شناسه‌ی رادیویی باز هم جداگانه، و ردیاب آن‌ها را بر اساس نشانی ICAO به هم می‌دوزد، هر چه را که در بررسی خطا رد شود کنار می‌گذارد و آخرین وضعیت شناخته‌شده‌ی هر هواپیما را نگه می‌دارد. اگر به مدت یک دقیقه هیچ پیامی نرسد، که معمولاً به این دلیل است که هواپیما به زیر افق رفته، رد آن منقضی می‌شود.

فصل 10

از یک گیرنده تا نقشه‌ی یک قاره

یک گیرنده دایره‌ای از آسمان به قطر چند صد کیلومتر را می‌شنود. نقشه‌ی اروپا به صدها گیرنده نیاز دارد، و گیرنده‌های سودمند در شهرها نیستند بلکه پراکنده‌اند: در سواحل، در دره‌ها، در جزیره‌ها، هر جا که دایره‌ی گیرنده‌ای دیگر به آن نمی‌رسد. هر گیرنده پیام‌های رمزگشایی‌شده‌ی خود را، هر کدام با مهر زمان رسیدن، از طریق اینترنت به یک سرویس مرکزی می‌فرستد. آن سرویس *تجمیع* می‌کند: همان پیام از یک هواپیمای بلندپرواز معمولاً هم‌زمان از ده یا بیست گیرنده می‌رسد، و موارد تکراری باید تشخیص داده و ادغام شوند. سرویس بررسی هم می‌کند: موقعیتی که با دید همه‌ی گیرنده‌های همسایه از همان هواپیما ناسازگار باشد، احتمالاً خطای رمزگشایی یا یک ترنسپاندر معیوب است، و علامت‌گذاری یا حذف می‌شود.

چندجانبه‌سنجی: یافتن هواپیماهایی که نمی‌گویند کجا هستند

همه‌ی هواپیماها موقعیت پخش نمی‌کنند. ترنسپاندرهای قدیمی‌تر با هویت و ارتفاع به رادار پاسخ می‌دهند اما ورودی ماهواره‌ای ندارند؛ برخی هواپیماها عمداً هیچ موقعیتی نمی‌فرستند. با این حال ارسال‌های 1090 MHz آن‌ها همچنان به زمین می‌رسد، و یک شبکه می‌تواند با وارونه کردن ناوبری ماهواره‌ای آن‌ها را مکان‌یابی کند. اگر چهار گیرنده با ساعت‌های دقیقاً همگام هر کدام لحظه‌ی رسیدن همان ارسال را ثبت کنند، اختلاف میان آن لحظه‌ها اختلاف فاصله‌ها را آشکار می‌کند: پیامی که یک میکروثانیه زودتر از گیرنده‌ی B به گیرنده‌ی A رسیده، از نقطه‌ای فرستاده شده که 300 m به A نزدیک‌تر از B است. همه‌ی نقاطی که این ویژگی را دارند روی یک سطح خمیده، یک هذلولی‌وار، میان A و B قرار دارند. سه سطح از این نوع، از چهار گیرنده، در محل هواپیما یکدیگر را قطع می‌کنند. این **چندجانبه‌سنجی** (multilateration) است، و به زمان‌سنجی در حد حدود یک‌دهم میکروثانیه، یعنی 30 m، میان گیرنده‌هایی با صدها کیلومتر فاصله نیاز دارد، که گیرنده‌ها آن را از همان ماهواره‌هایی که هواپیما استفاده می‌کند به دست می‌آورند.

یک ایده، دو بار

ناوبری ماهواره‌ای: یک گیرنده، چهار فرستنده با موقعیت معلوم، حل برای گیرنده. چندجانبه‌سنجی: یک فرستنده، چهار گیرنده با موقعیت معلوم، حل برای فرستنده. در هر دو، آنچه واقعاً اندازه گرفته می‌شود زمان است، و 1 میکروثانیه برابر 300 متر است.

فصل 11

کاربردها، و جاهایی که کم می‌آورد

کنترل ترافیک هوایی نخستین مشتری است. در سراسر اروپا، کنترلرها اکنون تصویری تلفیقی می‌بینند که در آن ADS-B، با به‌روزرسانی دو بار در ثانیه و دقتی در حد ماهواره، با رادار و چندجانبه‌سنجی ترکیب شده است؛ جایی که رادار هرگز به آن نرسید، بر فراز اقیانوس اطلس شمالی، قطب شمال، صحرای بزرگ آفریقا و بیشتر اقیانوس‌ها، پیام‌های ADS-B را گیرنده‌هایی دریافت می‌کنند که روی ماهواره‌های ارتباطی مدار پایین نصب شده‌اند، و این امکان داده است که هواپیماهایی که از اقیانوس اطلس می‌گذرند با فاصله‌ای بسیار کمتر از گذشته از هم پرواز کنند. هواپیماها دومین مشتری‌اند: یک هواپیمای مسافربری مجهز به «ADS-B In» ترافیک نزدیک را به خدمه‌اش نشان می‌دهد و آن را به سامانه‌ی پیشگیری از برخورد می‌دهد. فرودگاه‌ها از آن برای ردیابی هواپیماها و خودروها روی زمین در مه استفاده می‌کنند. پژوهشگران از داده‌های باز برای مطالعه‌ی صدا، مصرف سوخت، دنباله‌های تراکمی و تأخیرها بهره می‌برند. و گیرنده‌ای روی پشت‌بام یک مدرسه، به‌شکلی کوچک، مشارکت‌کننده‌ای در همه‌ی این‌هاست.

ضعف‌های سامانه مستقیماً از طراحی آن ناشی می‌شوند، و هر کدام ارزش فهمیدن دارد، نه صرفاً فهرست کردن. چون پیام‌ها به‌صورت آشکار پخش می‌شوند، نه رمزنگاری‌شده و نه امضاشده، در خود پیام هیچ‌چیز ثابت نمی‌کند که از یک هواپیما آمده است. فرستنده‌ای روی زمین می‌تواند، به‌طور غیرقانونی، پیامی کاملاً درست‌ساخت پخش کند که هواپیمایی ناموجود را توصیف می‌کند، و

گیرنده بی‌هیچ اعتراضی آن را رمزگشایی می‌کند. آنچه از سامانه محافظت می‌کند خود پیام نیست بلکه بافت پیرامون آن است: یک شبح روی رادار ظاهر نمی‌شود، با چندجانبه‌سنجی یافت نمی‌شود و مانند ترافیک واقعی رفتار نمی‌کند، و مراکز کنترل پیوسته اطلاعات را با هم تطبیق می‌دهند. نسخه‌ای از این پروتکل با امضای رمزنگاری‌شده سال‌هاست که مطرح است؛ مانع آن بیش از آنکه فنی باشد عملی است، زیرا همه‌ی ترنسپاندرهای جهان باید تغییر کنند.

چون موقعیت به گیرنده‌ی ماهواره‌ای هواپیما وابسته است، هر چیزی که ناوبری ماهواره‌ای را مختل کند ADS-B را هم مختل می‌کند. اخلال (jamming) و جعل (spoofing) سیگنال‌های ماهواره‌ای در نزدیکی مناطق درگیری رایج شده است، و هواپیمایی که از چنین منطقه‌ای می‌گذرد ممکن است نتواند موقعیتی محاسبه کند، یا موقعیتی نادرست محاسبه کند. آنگاه پیام‌هایش رده‌ی یکپارچگی تنزل‌یافته‌ای دارند، سامانه‌ی کنترلر آن‌ها را علامت‌گذاری می‌کند، و رادار، همان اندازه‌گیری مستقلی که ADS-B هرگز قرار نبود به‌طور کامل جایگزینش شود، مسئولیت را به عهده می‌گیرد. بنابراین رابطه‌ی این دو نه رابطه‌ی جانشین و پیشین، بلکه رابطه‌ی دو همکار با ضعف‌های مکمل است.

چون الزام قانونی هواپیماهای مسافربری و بیشتر هواپیماهای بزرگ‌تر را در بر می‌گیرد اما نه هر چه را که پرواز می‌کند، نقشه از اساس ناقص است. هواپیماهای سبک بیرون از فضای هوایی کنترل‌شده، گلایدرها، بالن‌ها و بسیاری از هواپیماهای نظامی ممکن است اصلاً ADS-B نداشته باشند، و برخی هواپیماهای سبک از سامانه‌های دیگری استفاده می‌کنند که گیرنده‌ی 1090 MHz آن‌ها را نمی‌شنود. و چون پخش همگانی هواپیما را شناسایی می‌کند، می‌تواند مالک آن را هم شناسایی کند: دنبال کردن یک جت خصوصی مشخص در عمل دنبال کردن یک شخص مشخص است، و این به برنامه‌هایی انجامیده که ثبت هواپیماهایی را که مالکانشان درخواست کنند پنهان می‌کنند، و به بحثی ادامه‌دار درباره‌ی اینکه آیا اطلاعاتی که هواپیما برای جهان پخش می‌کند می‌تواند خصوصی هم باشد. این بحث خوبی برای مطرح کردن با دانش‌آموزان بزرگ‌تر است، زیرا فیزیک هیچ پاسخی به آن نمی‌دهد.

فصل 12

تاریخچه‌ای کوتاه

1935 تا 1945

رادار اولیه در بریتانیا، آلمان و ایالات متحده توسعه می‌یابد؛ تا پایان جنگ، ترنسپاندرهای «شناسایی خودی یا دشمن» (IFF) به پالس‌های رادار با پاسخی کدگذاری‌شده پاسخ می‌دهند، که نیای رادار ثانویه است.

دهه‌های 1950 تا 1960

رادار ثانویه‌ی غیرنظامی استاندارد می‌شود: استعلام روی 1030 MHz، پاسخ روی 1090 MHz، کدهای شناسایی Mode A و ارتفاع Mode C.

دهه‌ی 1980

Mode S، با نشانی‌های یکتای 24 بیتی و پیام‌های داده، در آزمایشگاه لینکلن MIT توسعه می‌یابد و ICAO آن را می‌پذیرد. GPS برای کاربران غیرنظامی عملیاتی می‌شود.

دهه‌های 1990 تا 2000

ADS-B تعریف و آزمایش می‌شود، به‌ویژه در آلاسکا، جایی که پوشش راداری ناممکن و حوادث فراوان بود. اسکوییتر گسترده‌ی 1090 MHz در سطح بین‌المللی استاندارد می‌شود.

دهه‌ی 2010

رادیوهای نرم‌افزارمحور ارزان، دریافت را به یک سرگرمی تبدیل می‌کنند؛ شبکه‌های داوطلبانه با هزاران گیرنده پدید می‌آیند. گیرنده‌هایی برای پوشش اقیانوسی روی ماهواره‌ها به فضا فرستاده می‌شوند.

2020

ADS-B برای بیشتر هواپیماها در فضای هوایی کنترل‌شده در ایالات متحده (ژانویه) و اتحادیه‌ی اروپا (ژوئن، با دوره‌ی گذار تا پایان سال) اجباری می‌شود. آسمان، همه‌جا و همیشه، شروع به سخن گفتن می‌کند.

واژه‌نامه

ADS-B
Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (مراقبت وابسته‌ی خودکار - پخش همگانی). هواپیماهایی که موقعیت خود را پخش می‌کنند.

ارتفاع فشاری
ارتفاعی که از فشار هوا و با استفاده از جو استاندارد به دست می‌آید؛ همان ارتفاعی که هواپیماها گزارش می‌کنند.

CPR
گزارش موقعیت فشرده، طرح زوج/فرد که موقعیتی دقیق را در 34 بیت جا می‌دهد.

CRC
بررسی افزونگی چرخه‌ای، بررسی خطای 24 بیتی که در پایان هر پیام می‌آید.

اسکوییتر گسترده
ارسال خودبه‌خودی 112 بیتی Mode S که ADS-B را حمل می‌کند.

GNSS
سامانه‌ی جهانی ناوبری ماهواره‌ای: GPS، Galileo، GLONASS، BeiDou.

نشانی ICAO
هویت دائمی 24 بیتی ترنسپاندر یک هواپیما.

Mode S
استاندارد رادار ثانویه‌ی انتخابی که ADS-B بر آن ساخته شده است.

چندجانبه‌سنجی
مکان‌یابی یک فرستنده از روی اختلاف زمان رسیدن سیگنال به چند گیرنده.

افت مسیر
تضعیف سیگنال با فاصله، طبق قانون عکس مجذور.

افق رادیویی
دورترین فاصله‌ای که در آن خط راست میان آنتن و هواپیما از زمین بالاتر می‌گذرد.

SDR
رادیوی نرم‌افزارمحور: گیرنده‌ای که نمونه‌های خام سیگنال را برای رمزگشایی به رایانه می‌دهد.

SSR
رادار مراقبت ثانویه: زمین استعلام می‌کند، ترنسپاندر پاسخ می‌دهد.

ترنسپاندر
رادیوی هواپیما که به رادار پاسخ می‌دهد و ADS-B را روی 1090 MHz ارسال می‌کند.

طول موج
فاصله‌ی میان قله‌های پیاپی یک موج: c / f، یعنی 27.5 cm در 1090 MHz.

گام بعدی

از نظریه تا عمل: گیرنده را بسازید

دوازده فصل سامانه‌ای را توضیح دادند که اکنون می‌توانید آن را در دست بگیرید. کارگاه عملی آن‌ها را به کار یک بعدازظهر تبدیل می‌کند: چه چیزی را با 100 تا 150 یورو بخرید، آنتن را چگونه بسازید و کجا نصب کنید، چگونه یک Raspberry Pi را آماده کنید و فرستنده‌ی داده‌ی Dataero را نصب کنید، و چگونه ببینید که هواپیماهایی که می‌شنوید روی نقشه‌ی زنده و به نام ایستگاه شما ظاهر می‌شوند. هر فصل بالا آنجا یک اندازه‌گیری در انتظار خود دارد: افق رادیویی در برابر هواپیماهای واقعی، قانون عکس مجذور در ستون سیگنال، ریتم روزانه‌ی آسمان.

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