TỪ 12 ĐẾN 18 TUỔI - DÀNH CHO GIÁO VIÊN

Giải mã bầu trời: vật lý và tin học qua một hệ thống thật

Năm bài học và một dự án. Mỗi bài lấy một phần của ADS-B và triển khai đầy đủ phần vật lý hoặc tin học đằng sau nó: các phép suy luận ở mức lớp học theo kịp, ví dụ có lời giải với số liệu thật, các thí nghiệm minh họa giúp quan sát được ý tưởng, và những chỗ trực giác của học sinh dễ đi sai. Nhóm nhỏ tuổi hơn (12 đến 14) theo dõi các ý tưởng và phép tính; nhóm lớn hơn (15 đến 18) theo dõi các phép suy luận và thực hiện dự án.

Học - https://radar.dataero.eu/vi/learning/ages-12-18 2026-11-21

MỤC LỤC

Trước khi bắt đầu: vì sao một hệ thống thật đáng giá năm bài học

BÀI 1 - VẬT LÝ Sóng và phổ điện từ: bản tin được truyền trên cái gì

BÀI 2 - VẬT LÝ VÀ TOÁN HỌC Thời gian và vị trí: máy bay biết mình ở đâu bằng cách nào, và một mạng lưới tìm ra một máy bay không chịu nói như thế nào

BÀI 3 - TIN HỌC Bản tin số: 112 bit, cách chúng được gửi đi, và cách phát hiện lỗi

BÀI 4 - VẬT LÝ Sự lan truyền và tầm thu: độ cong của Trái Đất và định luật nghịch đảo bình phương

BÀI 5 - VẬT LÝ VÀ KỸ THUẬT Ăng-ten và máy thu: từ một sóng 27 centimét đến một chấm trên bản đồ

DỰ ÁN - TỪ HAI ĐẾN BỐN TUẦN Lắp một máy thu và kiểm chứng vật lý với bầu trời

Đáp án các thử thách của học sinh

TIẾP THEO Dự án, từng bước một

Trước khi bắt đầu: vì sao một hệ thống thật đáng giá năm bài học

Phần lớn vật lý được dạy từ 12 đến 18 tuổi được dạy theo từng mảnh: một chương về sóng ở chỗ này, một chương về phổ điện từ ở chỗ kia, một chủ đề về dữ liệu số trong môn tin học, một lần nhắc đến vệ tinh trong môn địa lý. ADS-B là một hệ thống duy nhất đang hoạt động, trong đó tất cả những mảnh ấy cùng lúc đều giữ vai trò then chốt, và lớp học có thể quan sát kết quả bằng một máy thu rẻ hơn một cuốn sách giáo khoa. Máy bay xác định vị trí của nó bằng cách đo thời gian tín hiệu radio từ các vệ tinh, đó là phép định vị bằng khoảng cách (trilateration) và tốc độ ánh sáng. Nó mã hóa kết quả vào 112 bit kèm một mã kiểm tra dư thừa vòng, đó là mã hóa nhị phân và phát hiện lỗi. Nó phát các bit đó đi dưới dạng một sóng radio điều chế vị trí xung ở 1090 MHz, đó là phổ, tần số và bước sóng. Sóng chỉ đến được máy thu theo một đường thẳng vượt qua độ cong của Trái Đất, và đến nơi yếu đi theo nghịch đảo bình phương của khoảng cách, đó là hình học và năng lượng. Một ăng-ten được tinh chỉnh dài một phần tư bước sóng biến nó thành dòng điện, đó là cộng hưởng. Và một mạng lưới máy thu có thể định vị cả một máy phát im lặng từ chênh lệch thời điểm đến, đó là bài toán vệ tinh lộn ngược. Mỗi bài dưới đây lấy một trong những nội dung ấy và triển khai nó như một chủ đề riêng, với ADS-B là ví dụ xuyên suốt chứ không phải vật trang trí.

Khóa học tham khảo ở trang chủ trình bày toàn bộ hệ thống dưới dạng câu chuyện; lớp học nên đọc chương 3 và 5 của nó trước bài 3, và chương 6 đến 8 trước bài 4 và 5; bảng thuật ngữ của nó là một tài liệu phát tay hữu ích. Trang này giả định bạn đã đọc nó và tập trung vào vật lý và cách giảng dạy. Các quy ước số liệu thống nhất trong suốt khóa học: c = 3.00 x 10^8 m/s, f = 1090 MHz, độ cao tính bằng mét, khoảng cách tính bằng kilômét, và máy bay ở độ cao bay bằng được lấy là 11 000 m (mực bay 360) và 250 m/s, trừ khi ví dụ nói khác.

Hai lời cảnh báo về trực giác. Học sinh thường tin rằng sóng radio là một loại âm thanh và rằng "radar" hay "vệ tinh" nhìn thấy máy bay. Cả hai đều sai, cả hai được xử lý rõ ràng trong bài 1 và 2, và cả hai sẽ còn xuất hiện lại; khóa học được thiết kế để mỗi bài sau cho bạn thêm một lý do mới để sửa chúng. Và những học sinh thành thạo công thức thường lại không thành thạo độ lớn: khóa học luôn hỏi "cái đó lớn cỡ nào?" ở mỗi bước, vì 300 m mỗi micro giây, 145 dB suy hao đường truyền và 2^24 địa chỉ là những con số khiến vật lý trở nên có thật.

BÀI 1 - VẬT LÝ

Sóng và phổ điện từ: bản tin được truyền trên cái gì

Hãy bắt đầu từ quan sát mà cả khóa học dựa vào: bản tin radio của một máy bay và một chùm ánh sáng là cùng một hiện tượng vật lý. Cả hai đều là sóng điện từ, điện trường và từ trường dao động lan truyền trong không gian mà không cần môi trường nào, với tốc độ c giống nhau cho mọi tần số trong chân không và gần như vậy trong không khí: 299 792 458 m/s, mà lớp học có thể lấy là 3.00 x 10^8 m/s. Đại lượng phân biệt radio với ánh sáng nhìn thấy, và ánh sáng nhìn thấy với tia X, chỉ là tần số f của dao động. Võng mạc của chúng ta phản ứng với các tần số khoảng từ 4 x 10^14 đến 8 x 10^14 Hz, mà ta cảm nhận là từ đỏ đến tím; ADS-B được phát ở 1.09 x 10^9 Hz, thấp hơn khoảng nửa triệu lần. Không có gì ở sóng khác nhau về bản chất; chỉ có mắt chúng ta là chọn lọc.

Hãy cùng lớp suy ra phương trình sóng thay vì chỉ phát biểu nó. Nếu một sóng truyền với tốc độ c và dao động f lần mỗi giây, thì trong một giây nó đi được quãng đường c và tạo ra f chu kỳ trọn vẹn; vì vậy mỗi chu kỳ chiếm một độ dài c / f. Độ dài đó là bước sóng, lambda, và do đó c = f x lambda. Áp dụng cho ADS-B: lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. Bản tin giữa máy bay và máy thu có các đỉnh sóng cách nhau 27.5 cm. Hãy cho lớp đặt nó lên một phổ do chính các em vẽ trên trục logarit: phát thanh FM ở 100 MHz và 3 m, ADS-B ở 1 090 MHz và 27.5 cm, điện thoại di động ở 1 800 MHz và 17 cm, Wi-Fi và lò vi sóng ở 2 450 MHz và 12 cm, tia hồng ngoại, ánh sáng nhìn thấy ở 5.6 x 10^14 Hz và 540 nm, và cứ thế đến tia X. Bài tập đặt sóng của máy bay giữa một chiếc điện thoại và một chiếc lò có giá trị hơn mọi bảng biểu, vì nó cho thấy chúng là hàng xóm của nhau.

Giờ hãy đối mặt trực tiếp với sự nhầm lẫn về âm thanh, vì nó phổ biến ở mọi nơi và vì sự so sánh dạy được cả hai hiện tượng. Âm thanh là một sóng áp suất dọc trong một môi trường; tốc độ của nó là tính chất của môi trường, 343 m/s trong không khí ở 20 độ, khoảng 1 500 m/s trong nước, và bằng không trong chân không. Radio là một sóng điện từ ngang hoàn toàn không cần môi trường, truyền với tốc độ c trong chân không và chậm hơn không đáng kể trong không khí. Hãy gắn một con số cho khoảng cách đó: 3.00 x 10^8 chia cho 343 là khoảng 875 000. Một máy bay cách 30 km phát ra một âm thanh và một bản tin cùng lúc sẽ đưa bản tin đến sau 100 micro giây và âm thanh sau 87 giây; khi âm thanh đến nơi, máy bay đã bay thêm 22 km. Thí nghiệm minh họa là một sợi dây trong lớp và một chiếc đèn pin chiếu qua sân chơi: sóng trên sợi dây rõ ràng cần sợi dây và truyền với tốc độ do sợi dây quyết định, còn chớp đèn pin đến đầu kia

mà không ai đo được độ trễ. Hãy liệt kê rõ những gì sợi dây có chung với ánh sáng (một sóng, một bước sóng, một tần số, một tốc độ cố định và do đó quan hệ nghịch giữa f và lambda) và những gì không chung (một môi trường, một tốc độ cỡ mét trên giây).

Kết thúc bằng sự phân cực, vốn dễ minh họa và sẽ phát huy tác dụng ở bài 5. Điện trường của sóng điện từ dao động theo một phương xác định, vuông góc với phương truyền. Ăng-ten bộ phát đáp của máy bay đặt thẳng đứng, nên sóng ADS-B phân cực thẳng đứng; ăng-ten thu cũng phải thẳng đứng, và khi xoay nằm ngang nó gần như không nghe được gì. Sóng trên sợi dây rung theo phương thẳng đứng đi qua được một khe thẳng đứng trên một hộp các-tông và bị chặn bởi một khe nằm ngang; hai miếng phim phân cực (lấy từ một cặp kính 3D rẻ tiền) đặt chéo nhau trước cửa sổ cho thấy điều tương tự với ánh sáng. Hãy yêu cầu lớp dự đoán điều gì xảy ra với việc thu sóng nếu đặt ăng-ten thu nằm ngang. Các em sẽ kiểm tra dự đoán đó trong dự án.

Ví dụ có lời giải để giao bài
Hệ thống ADS-B thứ hai, dùng cho máy bay hạng nhẹ ở Hoa Kỳ, phát ở 978 MHz. Bước sóng của nó là bao nhiêu, và một ăng-ten một phần tư bước sóng cho nó dài bao nhiêu? (0.307 m; 7.7 cm.) Học sinh làm được bài này là đã nắm được bài 1.

BÀI 2 - VẬT LÝ VÀ TOÁN HỌC

Thời gian và vị trí: máy bay biết mình ở đâu bằng cách nào, và một mạng lưới tìm ra một máy bay không chịu nói như thế nào

Mọi thứ máy bay phát đi về vị trí của nó đều đến từ định vị vệ tinh, và định vị vệ tinh về bản chất là một phép đo thời gian. Mỗi vệ tinh GNSS, bay quanh quỹ đạo ở độ cao khoảng 20 200 km, mang một đồng hồ nguyên tử và phát đi một tín hiệu cho biết vị trí của chính nó và thời điểm phát chính xác. Máy thu ghi lại thời điểm tín hiệu đến. Hiệu số đó nhân với c là khoảng cách đến vệ tinh, và một khoảng cách như vậy đặt máy thu lên một mặt cầu có bán kính đó, tâm là vệ tinh. Hãy để lớp tự suy ra: hai mặt cầu cắt nhau theo một đường tròn, ba mặt cầu tại hai điểm, một điểm nằm xa bề mặt Trái Đất và có thể loại bỏ. Vậy ba vệ tinh là đủ, với điều kiện máy thu có một đồng hồ hoàn hảo. Nhưng nó hoàn toàn không có; một bộ dao động thạch anh trôi nhiều hơn hẳn mức nano giây cần thiết. Lời giải, cũng là phần tinh tế nhất của chủ đề, là coi sai số đồng hồ của máy thu là ẩn số thứ tư và dùng thêm một vệ tinh thứ tư: bốn phương trình với bốn ẩn số (x, y, z và độ lệch đồng hồ), được giải liên tục. Vì vậy một máy thu GNSS cần nhìn thấy bốn vệ tinh, và như một kết quả phụ, nó giữ giờ chính xác trong vòng vài chục nano giây, đó là lý do các máy thu trong mạng lưới của bài 5 dùng chính những vệ tinh mà máy bay dùng để lấy giờ.

Hãy ghi các độ lớn lên bảng và thường xuyên quay lại với chúng. Ánh sáng đi được 0.300 m trong một nano giây và 300 m trong một micro giây. Sai số thời gian 1 micro giây là sai số khoảng cách 300 m; độ chính xác vài mét của một máy thu hiện đại tương ứng với việc đo thời gian ở mức mười nano giây. Thời gian truyền từ một vệ tinh ngay trên đỉnh đầu là 20 200 km / 3.00 x 10^5 km/s = 0.0673 s, và từ một vệ tinh gần đường chân trời khoảng 0.086 s, nên máy thu đang đo các chênh lệch vài mili giây với độ chính xác bằng một phần trăm triệu của chúng. Hãy hỏi lớp điều gì sẽ xảy ra nếu đồng hồ của một vệ tinh chạy nhanh một micro giây; các em sẽ thấy rằng mọi máy thu dùng vệ tinh đó sẽ bị đẩy lệch khoảng 300 m dọc theo đường hướng về phía nó, và đó là lý do đồng hồ vệ tinh được hiệu chỉnh từ mặt đất nhiều lần mỗi ngày.

Hãy tách bạch hai loại độ cao, vì bản tin mang cả hai và học sinh luôn hỏi. Lời giải từ vệ tinh cho độ cao hình học so với ellipsoid tham chiếu của Trái Đất. Tuy vậy, máy bay báo cáo độ cao khí áp: áp suất tĩnh bên ngoài thân máy bay được quy đổi thành độ cao theo Khí quyển Tiêu chuẩn Quốc tế, vốn giả định 1013.25 hPa và 15 độ ở mực nước biển, nhiệt độ giảm 6.5 độ mỗi kilômét. Vào ngày áp suất thực khác tiêu chuẩn, độ cao khí áp của mọi máy bay đều sai cùng một lượng, và đó đúng là điều mà việc phân cách cần: hai máy bay ở mực bay 350 và 360 luôn cách nhau 1 000 ft, dù thời tiết thế nào. Bản tin vị trí ADS-B mang độ cao khí áp theo bước 25 feet; bản tin vận tốc mang hiệu số giữa độ cao khí áp và độ cao hình học, nên máy thu có thể khôi phục cả hai. Với nhóm lớn tuổi, công thức ISA p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255 là một bài tập bảng tính tốt: giải ngược để tìm h từ p và kiểm tra rằng 11 000 m tương ứng với khoảng 227 hPa, khoảng một phần năm áp suất ở mực nước biển.

Giờ hãy lộn ngược bài toán. Một số máy bay phát trên 1090 MHz mà không có vị trí vệ tinh: các bộ phát đáp cũ hơn chỉ trả lời radar bằng mã nhận dạng và độ cao, hoặc máy bay có GNSS bị gây nhiễu. Một mạng lưới máy thu vẫn có thể định vị chúng. Giả sử bốn máy thu có đồng hồ đồng bộ ghi lại thời điểm đến của cùng một lần phát. Máy phát chưa biết, các máy thu đã biết: đây là bài toán GNSS với vai trò của cái đã biết và cái chưa biết đổi chỗ cho nhau. Một bản tin đến máy thu A sớm hơn máy thu B một micro giây đã được phát từ một điểm gần A hơn B 300 m, và quỹ tích các điểm như vậy là một mặt hyperboloid nhận A và B làm tiêu điểm. Ba cặp độc lập từ bốn máy thu cho ba mặt hyperboloid, giao điểm của chúng là máy bay. Đây là định vị đa điểm (multilateration), và nó cần đồng hồ của các máy thu khớp nhau đến khoảng 100 ns, điều mà chúng có được nhờ các vệ tinh. Với lớp học, hãy rút gọn về hai chiều bằng bài tập trên sân chơi: ba học sinh cầm đồng hồ bấm giờ đứng ở các điểm đã đo đạc, một học sinh thứ tư nấp ở đâu đó và vỗ tay, ba em ghi lại độ trễ đã hiệu chỉnh theo thời gian phản xạ, và cả lớp vẽ các đường hyperbol (hoặc đơn giản hơn, dùng các vị trí thử trên một bản vẽ theo tỉ lệ) để tìm người vỗ tay, với tốc độ 343 m/s. Sau đó hãy hỏi độ chính xác thời gian cần đạt đến mức nào để làm điều tương tự với sóng radio trên 200 km, và để các em cảm nhận khoảng cách giữa một chiếc đồng hồ bấm giờ và một đồng hồ nguyên tử.

Ví dụ có lời giải để giao bài
Hai máy thu cách nhau 60 km ghi nhận một bản tin chênh nhau 50 micro giây. Máy bay ở gần máy thu thứ nhất hơn bao nhiêu? (15 km.) Nếu đồng hồ của hai máy thu lệch nhau 1 micro giây, điều đó gây ra sai số bao nhiêu cho đáp án? (300 m.) Học sinh nào giải thích được vì sao đáp án thứ hai không phụ thuộc vào khoảng cách là đã hiểu định vị đa điểm đòi hỏi điều gì.

BÀI 3 - TIN HỌC

Bản tin số: 112 bit, cách chúng được gửi đi, và cách phát hiện lỗi

Bộ phát đáp của máy bay gửi dữ liệu ADS-B dưới dạng squitter mở rộng Mode S: một phần mở đầu dài 8 micro giây, theo sau là 112 bit dữ liệu với tốc độ đúng một bit mỗi micro giây. Hãy bắt đầu bài học bằng phần mở đầu, vì nó trả lời một câu hỏi mà học sinh chưa nghĩ tới: làm sao máy thu biết một bản tin đã bắt đầu, khi kênh đầy nhiễu và đầy máy bay khác? Phần mở đầu là một mẫu cố định gồm bốn xung tại 0, 1, 3.5 và 4.5 micro giây. Bộ giải mã liên tục tìm kiếm mẫu đó; khi tìm thấy, nó biết cả việc có một bản tin theo sau lẫn chính xác thời điểm mỗi khe bit bắt đầu. Mọi giao thức số mà học sinh từng gặp, từ Wi-Fi đến mã QR, đều có thứ tương tự, và đây là thời điểm tốt để nói điều đó.

Tiếp theo là phương pháp điều chế. Một máy phát radio có thể bật hoặc tắt; vậy làm sao gửi số 1 hay số 0? ADS-B dùng điều chế vị trí xung: mỗi khe bit dài một micro giây được chia làm hai nửa, một xung ở nửa đầu rồi im lặng nghĩa là 1, im lặng rồi một xung nghĩa là 0. Hãy vẽ vài bit dưới dạng xung lên bảng và cho lớp đọc chúng. Sau đó hỏi vì sao cách này tốt hơn cách hiển nhiên "có xung là 1, không xung là 0". Với một chút gợi ý, hai lý do sẽ lộ ra. Mỗi bit luôn có đúng một xung, nên máy thu giữ được nhịp ngay cả qua một chuỗi số 0, và nó có thể quyết định mỗi bit bằng cách hỏi nửa nào mạnh hơn thay vì hỏi xung có vượt một ngưỡng tuyệt đối nào đó không, khiến việc giải mã không phụ thuộc vào độ mạnh của tín hiệu. Một chuỗi dài số 0 trong cách ngây thơ sẽ không thể phân biệt với sự im lặng; trong PPM nó là một nhịp trống đều đặn của các xung ở nửa sau.

Bốn bit trong điều chế vị trí xung: 1, 0, 1, 1



Mỗi khe dài 1 micro giây. Xung ở nửa đầu: 1. Xung ở nửa sau: 0.

Giờ là cách bố trí 112 bit, mà đến cuối bài lớp học nên thuộc lòng để tự viết lại. Bit 1 đến 5 là định dạng đường xuống (downlink format), bằng 17 với ADS-B từ bộ phát đáp. Bit 6 đến 8 là mã năng lực (capability). Bit 9 đến 32 là địa chỉ ICAO 24 bit, danh tính cố định của máy bay. Bit 33 đến 88 là trường bản tin 56 bit, năm bit đầu của nó là mã loại (type code), cho biết 51 bit còn lại chứa gì: bản tin nhận dạng (mã loại 1 đến 4) mang hô hiệu tám ký tự dưới dạng tám ký tự 6 bit; bản tin vị trí trên không (9 đến 18) mang 12 bit độ cao khí áp, một cờ cho biết đây là khung chẵn hay lẻ, và mỗi thứ 17 bit cho vĩ độ và kinh độ đã mã hóa; bản tin vận tốc (19) mang các thành phần đông-tây và bắc-nam của tốc độ mặt đất, tốc độ lên xuống, và hiệu số giữa độ cao khí áp và độ cao hình học. Bit 89 đến 112 là 24 bit chẵn lẻ. Hãy giao phép tính: 24 bit địa chỉ cho 2^24 = 16 777 216 máy bay; tám ký tự 6 bit cho mỗi ký tự 64 ký hiệu, đủ cho chữ cái, chữ số và dấu cách; 12 bit độ cao theo bước 25 feet phủ được 102 400 feet; và 17 bit vĩ độ, nếu dùng ngây thơ trên 180 độ, chỉ phân giải được 1.4 km, điều này đặt ra câu hỏi mà báo cáo vị trí nén (CPR) trả lời. Hãy giải thích CPR trong một đoạn: 17 bit cho vị trí bên trong một vùng chính xác đến vài mét, nhưng không cho biết vùng nào; máy bay luân phiên giữa hai lưới vùng, chẵn và lẻ, và một máy thu có được mỗi loại một bản tin sẽ xác định được vùng một cách rõ ràng, rồi theo dõi chỉ từ từng bản tin đơn lẻ. Đây là một ví dụ gọn gàng về việc đạt độ chính xác cao hơn với cùng số bit nhờ tận dụng thời gian.

DF	CA	địa chỉ ICAO	ME - phần dữ liệu	PI
5 bit	3 bit	24 bit	56 bit	24 bit
định dạng đường xuống	năng lực	danh tính máy bay duy nhất	vị trí, độ cao, vận tốc, hô hiệu hoặc trạng thái, tùy theo mã loại trong 5 bit đầu	kiểm tra lỗi (CRC)

Hãy đưa cho lớp một bản tin thật và để các em mổ xẻ nó. Chuỗi thập lục phân 8D4840D6202CC371C32CE0576098 gồm 28 chữ số hex, tức 112 bit. Chuyển hai chữ số đầu, 8D, sang nhị phân được 10001 101: DF = 17, CA = 5. Sáu chữ số tiếp theo, 4840D6, là địa chỉ ICAO, mà bảng phân bổ gán cho Hà Lan. Các chữ số tiếp theo, 20 ..., bắt đầu bằng 00100, mã loại 4, một bản tin nhận dạng, và giải mã các ký tự 6 bit theo sau cho hô hiệu KLM1023. Sáu chữ số cuối, 576098, là phần chẵn lẻ. Một lớp

có bảng tính hoặc vài dòng Python có thể giải mã toàn bộ trong một tiết học, và khả năng cầm một chuỗi hex mà nói được "đó là một máy bay của KLM đang thông báo số hiệu chuyến bay" là kết quả cần hướng tới.

> `8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098`
>
> 8D: định dạng đường xuống 17, năng lực 5. 4840D6: địa chỉ ICAO, được phân cho Hà Lan. 20...: mã loại 4, nhận dạng, hô hiệu KLM1023. 576098: 24 bit chẵn lẻ.

Kết thúc bằng phần chẵn lẻ, vì đó là ý tưởng tin học đáng triển khai nhất. Trên một sân bay đông đúc, bản tin từ nhiều máy bay khác nhau liên tục chồng lên nhau tại máy thu, và các xung cũng bị mất vì nhiễu; bộ giải mã chắc chắn sẽ ghép sai bit. Trường 24 bit ở cuối là một mã kiểm tra dư thừa vòng (CRC): 88 bit bản tin được coi như một số nhị phân dài và được chia, trong một phép tính đặc biệt mà phép trừ là phép XOR (hoặc loại trừ), cho một đa thức sinh cố định 25 bit; số dư chính là CRC. Máy thu thực hiện lại phép chia trên các bit đã giải mã và so sánh. Chỉ cần một bit bị hỏng, hai bit, hay bất kỳ chuỗi lỗi liên tiếp nào dài tới 24 bit cũng làm thay đổi số dư, nên bản tin bị hỏng sẽ bị loại bỏ. Hãy minh họa ý tưởng ở quy mô nhỏ bằng một CRC 4 bit trên một bản tin 8 bit làm bằng tay, hoặc bằng một tương tự đơn giản hơn là chữ số kiểm tra trên mã vạch; sau đó cho nhóm lớn tuổi viết CRC-24 thật trong vài dòng mã và kiểm tra rằng phần chẵn lẻ của bản tin ví dụ ra đúng, còn lật một bit thì làm nó thất bại. Đây là cách phát hiện lỗi mà mọi hệ thống hiện đại đều dùng, gặp trong một bối cảnh mà một lỗi bị bỏ sót có thể đưa một máy bay ma lên màn hình của kiểm soát viên.

Ví dụ có lời giải để giao bài
Một lần phát hoàn chỉnh kéo dài bao lâu, và nếu một bộ phát đáp gửi 4.5 squitter mở rộng mỗi giây, nó dành bao nhiêu phần thời gian để phát ADS-B? (120 micro giây; 540 micro giây mỗi giây, tức 0.054 phần trăm.) Về nguyên tắc, bao nhiêu máy bay có thể dùng chung kênh trước khi kênh bận liên tục, bỏ qua mọi thứ khác được phát trên đó? (Khoảng 1 850, đó là lý do tắc nghẽn trên những vùng trời đông đúc nhất là một mối lo kỹ thuật thực sự.)

BÀI 4 - VẬT LÝ

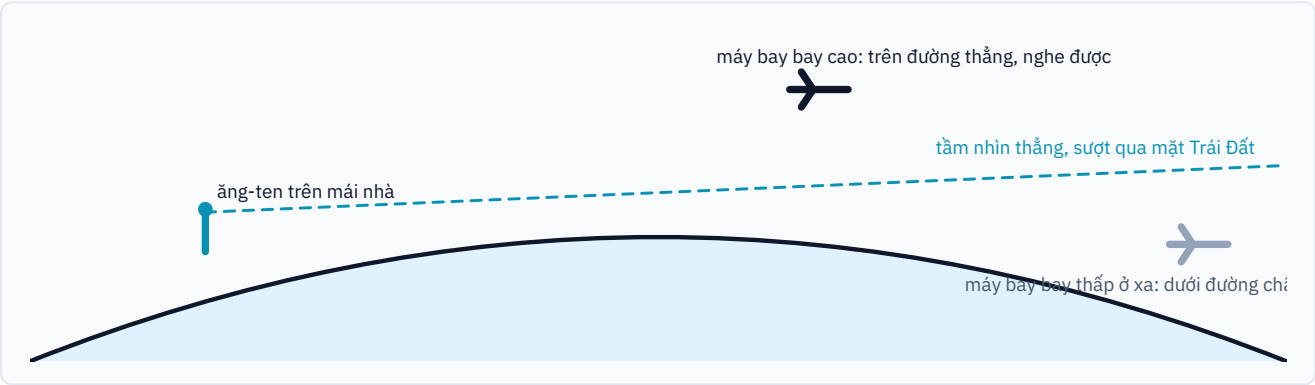
Sự lan truyền và tầm thu: độ cong của Trái Đất và định luật nghịch đảo bình phương

Một máy thu có thể nghe được máy bay ở xa bao nhiêu? Câu hỏi có hai câu trả lời độc lập, hình học và năng lượng, và mục đích của bài học là suy ra cả hai rồi phát hiện rằng các nhà thiết kế đã sắp đặt để chúng trùng nhau. Bắt đầu với hình học. Ở 1090 MHz, sóng radio không nhiễu xạ quanh Trái Đất ở mức có ích; nó hoạt động như ánh sáng và truyền theo đường thẳng. Vì vậy máy thu chỉ nghe được máy bay ở trên đường chân trời của nó, tức là những máy bay mà đường thẳng nối đến ăng-ten không đi xuyên qua mặt đất. Hãy cùng lớp suy ra khoảng cách đến đường chân trời. Một ăng-ten ở độ cao h trên một mặt cầu bán kính R nhìn thấy đường chân trời tại nơi tia nhìn của nó tiếp xúc với mặt cầu. Tiếp tuyến, bán kính đến tiếp điểm và bán kính đến ăng-ten tạo thành một góc vuông tại tiếp điểm, nên theo định lý Pythagoras d^2 + R^2 = (R + h)^2, suy ra d^2 = 2Rh + h^2. Vì h rất nhỏ so với R, d = sqrt(2Rh). Với R = 6 371 km và h tính bằng mét, d tính bằng kilômét = sqrt(2 x 6371 x h / 1000) = 3.57 sqrt(h). Mật độ khí quyển, và do đó chiết

suất của nó, giảm theo độ cao, làm các tia radio hơi cong xuống; cách hiệu chỉnh tiêu chuẩn là coi Trái Đất như có bán kính bằng bốn phần ba bán kính thật, thay 3.57 bằng 4.12. Toàn bộ tầm nhìn thẳng từ một ăng-ten ở độ cao h1 đến một máy bay ở độ cao h2 là tổng của hai khoảng cách chân trời:

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

Ăng-ten trên mái nhà cao 20 m, máy bay ở 11 000 m: 4.12 x (4.47 + 104.9) = 451 km. Cùng ăng-ten đó, máy bay ở 1 000 m: 4.12 x (4.47 + 31.6) = 149 km. Máy bay trên đường băng cách 30 km: 4.12 x (4.47 + 2) = 27 km, nên không nghe được.



Hãy cho lớp vẽ đồ thị d theo h2 với độ cao ăng-ten của chính trường mình; đường cong lúc đầu dốc rồi thoải dần giải thích hình dạng vùng phủ của mọi máy thu: một vòng tròn bán kính 400 km trở lên với máy bay đang bay bằng, vài chục kilômét với máy bay đang tiếp cận hạ cánh, và không gì trên mặt đất trừ ở sân bay ngay bên cạnh. Nó cũng giải thích vì sao độ cao quan trọng hơn mọi tính chất khác của một máy thu, và vì sao một ngọn đồi giữa bạn và sân bay, hay chính cánh của máy bay khi nó nghiêng rẽ đi, cắt đứt đường bay ngay lập tức. Thí nghiệm trên sân chơi của khóa học tiểu học, đứng trên ghế nhìn xa hơn ngồi xổm, không hề quá đơn giản với lứa tuổi này nếu bạn tiếp nối nó bằng phép suy luận; điều quan trọng là giờ các em biết vì sao.

Giờ đến năng lượng. Một bộ phát đáp bức xạ công suất đỉnh vài trăm oát, gần như đều theo mọi hướng nằm ngang. Ở khoảng cách d, công suất đó đã trải ra trên một mặt cầu có diện tích 4 pi d^2, nên công suất mà một ăng-ten có diện tích hiệu dụng cố định thu được giảm theo 1 / d^2: đó là định luật nghịch đảo bình phương, mà lớp nên tự suy ra từ diện tích mặt cầu thay vì học thuộc. Khoảng cách gấp đôi, còn một phần tư công suất; gấp mười, còn một phần trăm. Kỹ sư vô tuyến biểu diễn suy hao giữa một máy phát đẳng hướng và một máy thu đẳng hướng bằng decibel, và công thức tiêu chuẩn, mà nhóm lớn tuổi có thể chấp nhận hoặc tự suy ra từ diện tích hiệu dụng của một ăng-ten, lambda^2 / 4 pi, là:

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

Ở 400 km và 1090 MHz: 20 x 2.60 + 20 x 3.04 + 32.44 = 52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 dB. Một máy phát 250 W là +54 dBm; công suất thu được là 54 - 145 = -91 dBm, khoảng 8 x 10^-13 W, tức một phần triệu của một phần triệu oát.

Hãy dành vài phút cho decibel nếu lớp chưa học, vì nó biến một phép nhân trải qua mười bốn bậc độ lớn thành một phép cộng, và vì chính con số này mang tính giáo dục: một máy thu trên mái nhà đang phát hiện một tín hiệu yếu hơn 10^14.5 lần so với lúc nó rời máy bay. Một máy thu nghiệp dư tốt có thể giải mã đến khoảng -100 dBm, nên ở 400 km vẫn còn dư khoảng 9 dB, nghĩa là giới hạn năng lượng và đường

chân trời hình học của một máy bay chở khách đang bay bằng rơi vào cùng một chỗ. Đó không phải là ngẫu nhiên; công suất bộ phát đáp và tiêu chuẩn máy thu được quy định sao cho máy bay nghe được đến đường chân trời và không xa hơn nhiều, giúp kênh không bị tràn ngập bởi các lần phát từ nước bên cạnh.

Hai điều tinh chỉnh cho nhóm lớn tuổi. Thứ nhất, hiệu ứng Doppler: một máy bay tiến lại với tốc độ 250 m/s làm tần số thu được dịch đi f x v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz, chưa tới một phần triệu của sóng mang, mà máy thu không bao giờ nhận ra; hãy đối chiếu với hiệu ứng Doppler nghe được trong âm thanh của máy bay, khi v / c là 250 / 343 và cao độ thay đổi gần một quãng tám khi nó bay qua. Thứ hai, thời gian truyền tín hiệu: 400 km với tốc độ c mất 1.33 ms, nên vị trí trong bản tin đã cũ 1.33 ms, trong thời gian đó máy bay đã di chuyển 33 cm; không đáng kể với một bản đồ, nhưng quyết định với định vị đa điểm của bài 2, vốn sống nhờ chính những micro giây này.

Ví dụ có lời giải để giao bài
Một máy thu trên cột cao 10 m nghe được một máy bay đang bay bằng ở 11 000 m nhưng không nghe được một máy bay hạng nhẹ ở 600 m cách đó 130 km. Máy bay hạng nhẹ có nằm dưới đường chân trời không? (Đường chân trời: 4.12 x (3.16 + 24.5) = 114 km, nên có.) Máy thu cần đặt cao bao nhiêu để nghe được nó? (Cần 4.12 x (sqrt(h1) + 24.5) = 130, nên sqrt(h1) = 7.05, h1 = 50 m.)

BÀI 5 - VẬT LÝ VÀ KỸ THUẬT

Ăng-ten và máy thu: từ một sóng 27 centimét đến một chấm trên bản đồ

Ăng-ten là một vật dẫn trong đó sóng điện từ đi qua cảm ứng ra một dòng điện xoay chiều; ăng-ten thu và ăng-ten phát là cùng một thiết bị hoạt động theo hai chiều ngược nhau, một tính thuận nghịch mà lớp nên được nói rõ. Dòng điện cảm ứng lớn nhất khi vật dẫn cộng hưởng: khi chiều dài của nó khiến phân bố dòng điện dọc theo nó khớp với dao động của sóng, đúng như một sợi dây đàn có độ dài vừa đúng cộng hưởng với một nốt nhạc nhất định, hay một chiếc xích đu với một nhịp đẩy nhất định. Cộng hưởng cơ bản của một vật dẫn thẳng xảy ra ở nửa bước sóng, tức 13.75 cm ở 1090 MHz, với dòng điện lớn nhất ở giữa và bằng không ở hai đầu. Ăng-ten ADS-B thực tế, trên máy bay và trên hầu hết máy thu, là một ăng-ten đơn cực một phần tư bước sóng: một thanh thẳng đứng dài 6.9 cm đứng trên một mặt phẳng tiếp đất dẫn điện, mặt này phản chiếu nó về mặt điện để thanh và ảnh của nó cùng nhau tạo thành lưỡng cực nửa bước sóng. Trên máy bay, thân máy bay là mặt phẳng tiếp đất; một ăng-ten 1090 MHz mua sẵn giấu cùng hình học đó bên trong ống của nó, xếp chồng nhiều lần để tập trung độ nhạy về phía đường chân trời. Một mô hình làm trên lớp từ một thanh dài 6.9 cm gắn trên nắp hộp thiếc cho thấy hình học và chiều dài, đo bằng thước so với sóng 27.5 cm; tuy nhiên máy thu của dự án dùng ăng-ten đã được nhà sản xuất tinh chỉnh, vì chỉ vài milimét sai số cũng làm lệch cộng hưởng một ăng-ten tự làm và nó chỉ nghe được một phần bầu trời.

Hãy triển khai đồ thị bức xạ, vì nó dự đoán một điều mà lớp có thể quan sát. Một ăng-ten đơn cực thẳng đứng bức xạ và thu mạnh nhất về phía đường chân trời và hoàn toàn không theo trục của chính nó; độ nhạy của nó, vẽ trong không gian ba chiều, có hình một chiếc bánh vòng (donut) với ăng-ten xuyên qua lỗ giữa. Vì vậy một máy thu thường nghe hoàn hảo những máy bay cách 300 km và mất vài giây một chiếc bay ngay trên đầu, và lớp có thể quan sát điều này trên máy thu của chính mình. Một ăng-ten đồng tuyến (collinear), gồm nhiều phần tử cộng hưởng xếp chồng, ép chiếc bánh vòng dẹt hơn, tăng độ nhạy ở đường

chân trời nơi có những máy bay ở xa, đổi lại lỗ phía trên đầu lớn hơn: đó là độ lợi ăng-ten, biểu diễn bằng dBi, và nó đến từ việc phân bố lại độ nhạy, chứ không bao giờ tạo ra thêm độ nhạy. Sự phân cực, từ bài 1, giờ có một hệ quả thực tế mà dự án sẽ kiểm tra: ăng-ten phải đặt thẳng đứng.

Giữa ăng-ten và máy tính có ba công đoạn, mỗi công đoạn là một bài học nhỏ. Bộ lọc thông dải cho 1090 MHz đi qua và chặn các tín hiệu điện thoại di động mạnh hơn nhiều, cách đó vài trăm megahertz, vốn sẽ làm bão hòa bộ khuếch đại. Bộ khuếch đại tạp âm thấp, đặt tại ăng-ten chứ không phải tại máy thu, nhân tín hiệu lên một nghìn lần trước khi nó vào cáp; thứ tự này quan trọng, vì một cáp đồng trục ở 1090 MHz mất khoảng một nửa tín hiệu, 3 dB, sau mỗi mười mét, và khuếch đại sau khi đã suy hao sẽ khuếch đại luôn cả nhiễu của cáp cùng với tín hiệu. Sau đó là radio định nghĩa bằng phần mềm: một thiết bị USB giá 20 euro vốn được làm ra để thu truyền hình, hạ tần tín hiệu về băng gốc và lấy mẫu nó hai triệu lần mỗi giây thành một dòng số. Từ đó trở đi, bài toán vô tuyến trở thành bài toán lập trình. Phần mềm miễn phí quét dòng mẫu để tìm mẫu phần mở đầu, đo xem nửa nào của mỗi khe micro giây mang nhiều năng lượng hơn, ghép thành 112 bit, tính CRC, và nếu đạt thì giải mã các trường. Sau đó, một bộ theo dõi ghép cặp các khung vị trí chẵn và lẻ, gộp vị trí, vận tốc và nhận dạng theo địa chỉ ICAO, và giữ trạng thái của từng máy bay cho đến khi bản tin ngừng đến.

Hãy giao chuỗi đó cho lớp dưới dạng một sơ đồ do các em tự vẽ, kèm đại lượng ở mỗi công đoạn: vài nano vôn dòng điện xoay chiều tại ăng-ten; vài micro vôn sau bộ khuếch đại; hai triệu số 8 bit mỗi giây từ SDR; các khung 112 bit từ bộ giải mã, có lẽ vài trăm khung mỗi giây; một bản ghi cho mỗi máy bay từ bộ theo dõi. Điều cần đọng lại là một chấm trên bản đồ là điểm cuối của một chuỗi mà mỗi mắt xích là một ý tưởng các em giờ đã hiểu: cộng hưởng, lọc, khuếch đại, lấy mẫu, so khớp mẫu, giải mã, kiểm tra lỗi, tổng hợp.

Ví dụ có lời giải để giao bài
Một sợi cáp mất 3 dB mỗi 10 m ở 1090 MHz. Vậy một đoạn cáp 20 m mất bao nhiêu phần tín hiệu? (6 dB, ba phần tư.) Nếu giới hạn của máy thu là -100 dBm và tín hiệu tại ăng-ten từ một máy bay cách 400 km là -91 dBm, tín hiệu có vượt qua được cáp mà không cần bộ khuếch đại không? (Vừa đủ: -97 dBm. Chỉ cần thêm chút suy hao, mưa trên các đầu nối hay một đoạn cáp dài hơn, là máy bay ở đường chân trời biến mất. Đó là lý do bộ khuếch đại được đặt tại ăng-ten.)

DỰ ÁN - TỪ HAI ĐẾN BỐN TUẦN

Lắp một máy thu và kiểm chứng vật lý với bầu trời

Dự án biến năm bài học thành các phép đo. Thiết bị gồm một USB radio định nghĩa bằng phần mềm (khoảng 25 euro), một ăng-ten 1090 MHz đã được nhà sản xuất tinh chỉnh (50 đến 70 euro), vài mét cáp đồng trục, và một máy tính xách tay hoặc một Raspberry Pi chạy một trong các bộ giải mã miễn phí (dump1090 và các phiên bản kế thừa của nó là tiêu chuẩn). Việc cài đặt mất một buổi chiều, và chỉ trong vài phút phần mềm hiển thị một bảng các máy bay với địa chỉ ICAO, hô hiệu, vị trí, độ cao và tốc độ, cùng một bản đồ. Mọi thứ trong dự án chỉ thu; không có gì phát đi, và lớp học cần hiểu rằng phát trên các tần số hàng không là vừa phạm pháp vừa nguy hiểm. Việc lên mái nhà cần sự cho phép thông thường của nhà trường; một cửa sổ ở tầng cao hướng về các luồng bay chính là một khởi đầu hoàn toàn tốt. Trang Đóng góp dữ liệu (Become a feeder) trên trang web này hướng dẫn từng bước cùng quy trình cài đặt đó và cho phép máy thu của trường cấp dữ liệu cho bản đồ trực tiếp.

Khảo sát thứ nhất là đường chân trời vô tuyến. Với mỗi máy bay, bộ giải mã báo cáo khoảng cách và độ cao tại lần cuối nghe được nó. Trong một ngày, hãy thu thập tầm thu tối đa của các máy bay ở nhiều dải độ cao và vẽ đồ thị tầm thu theo độ cao. Học sinh có công thức từ bài 4 và độ cao ăng-ten; các em nên dự đoán đường cong trước khi xem dữ liệu, rồi so sánh. Sự phù hợp thường tốt với máy bay bay cao và kém hơn với máy bay bay thấp, và cuộc thảo luận về nguyên nhân (tòa nhà, địa hình, lỗ phía trên đầu của ăng-ten, chính máy bay tự che khuất) là kiểu đối chiếu giữa lý thuyết và đo đạc mà sách giáo khoa không thể mang lại. Một bản đồ các máy bay xa nhất nghe được theo mỗi hướng, do phần mềm vẽ ra, cho thấy địa hình của cả vùng dưới dạng những vùng bóng trong vùng phủ.

Khảo sát thứ hai là ăng-ten. Hãy so sánh tốc độ bản tin và tầm thu tối đa khi ăng-ten đặt trong nhà, cạnh cửa sổ và trên mái; thẳng đứng và nằm ngang; đặt trên một bề mặt kim loại và giữ cách xa mọi kim loại. Mỗi phép so sánh kiểm tra một khẳng định cụ thể từ bài 1 và bài 5, và mỗi kết quả nên được dự đoán trước. Phép thử phân cực ấn tượng nhất: khi đặt nằm ngang, ăng-ten mất phần lớn số máy bay.

Khảo sát thứ ba là dữ liệu. Hãy ghi lại trọn một ngày giao thông và đặt câu hỏi cho nó: giờ đông đúc nhất, phân bố độ cao bay bằng (học sinh chờ đợi một sự trải rộng nhưng thấy phần lớn máy bay chở khách nằm giữa 10 000 và 12 000 m), tốc độ lên cao của các chuyến cất cánh từ sân bay gần nhất, những quốc gia có máy bay bay qua thường xuyên nhất (từ bảng phân bổ địa chỉ ICAO). Nhóm lớn tuổi có thể tự giải mã các bản tin thô, từ chuỗi hex mà phần mềm ghi lại, và kiểm tra CRC bằng mã của chính mình. Một lớp có máy thu thứ hai tại một trường đối tác cách 30 km trở lên, cả hai đều có dữ liệu gắn dấu thời gian GNSS, có thể thử định vị đa điểm hai chiều cho một máy bay mà cả hai cùng nghe được và so sánh với vị trí máy bay phát đi: kết quả tham vọng nhất của khóa học, và là một kết quả có thật.

Kết thúc bằng những câu hỏi mà hệ thống gợi ra nhưng không trả lời. Các bản tin không được ký số, nên một máy phát có thể phát đi một máy bay ma; điều gì bảo vệ hệ thống, và một phiên bản có ký số sẽ tốn kém những gì? Máy bay phụ thuộc vào các vệ tinh có thể bị gây nhiễu; điều gì xảy ra với bức tranh của kiểm soát viên khi điều đó xảy ra? Dữ liệu nhận dạng được máy bay, và một máy bay có thể nhận dạng được một con người; ai nên được phép theo dõi ai? Một lớp đã tự lắp máy thu xứng đáng với những câu hỏi này, và chúng là đề tài tốt cho một bài luận cuối khóa hoặc một cuộc tranh luận.

Đáp án các thử thách của học sinh

Trang của học sinh đưa ra tám thử thách, một hoặc hai cho mỗi bài, có thể dùng làm bài tập về nhà hoặc bài kiểm tra cuối khóa. Đáp án, kèm phần lập luận mà một câu trả lời đạt điểm tối đa cần có:

1. Bước sóng ở 1090 MHz: lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. Phần tử một phần tư bước sóng: 6.9 cm. Lập luận: c = f x lambda, với tốc độ ánh sáng cố định buộc tần số và bước sóng tỉ lệ nghịch.
2. Ánh sáng nhanh hơn âm thanh 3.00 x 10^8 / 343 lần, tức khoảng 875 000 lần. Trên 30 km, bản tin mất 100 micro giây và âm thanh mất 87 s; trong thời gian đó máy bay bay với tốc độ 250 m/s đi được 22 km.
3. Sai số đồng hồ 2 micro giây cho sai số khoảng cách 2 x 10^-6 x 3 x 10^8 = 600 m. Cần bốn vệ tinh vì độ lệch đồng hồ của máy thu là ẩn số thứ tư bên cạnh x, y và z.
4. 2^24 = 16 777 216 địa chỉ. Một bản tin 112 bit với tốc độ 1 bit mỗi micro giây kéo dài 112 micro giây, 120 micro giây nếu tính cả phần mở đầu.

5. Trong 8D4840D6..., 8D là 10001101: năm bit đầu 10001 bằng 17, nên DF = 17, một bản tin ADS-B từ bộ phát đáp Mode S; ba bit tiếp theo, 101, cho CA = 5. 4840D6 là địa chỉ ICAO.
6. Đường chân trời vô tuyến từ một ăng-ten cao 15 m đến một máy bay ở 9 000 m: 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km. Với một máy bay ở 300 m: 4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km.
7. Tăng gấp đôi khoảng cách làm công suất thu được giảm còn một phần tư, vì cùng một công suất phát trải ra trên một mặt cầu có diện tích lớn gấp bốn lần. Suy hao đường truyền ở 200 km và 1090 MHz: 20 x 2.30 + 60.7 + 32.4 = 139 dB, ít hơn 6 dB so với ở 400 km, phù hợp với hệ số bốn.
8. Ăng-ten đặt nằm ngang bị phân cực chéo so với sóng phân cực thẳng đứng và thu được rất ít; dòng điện cảm ứng phụ thuộc vào thành phần điện trường dọc theo vật dẫn. Một máy thu ở tầng trệt mất tầm thu vì khoảng cách chân trời của nó, 4.12 x sqrt(h1), nhỏ đi, và vì các tòa nhà chắn tầm nhìn thẳng.

TIẾP THEO

Dự án, từng bước một

Dự án của bài 6 giả định đã có sẵn một máy thu; buổi thực hành sẽ lắp ráp nó. Nội dung được viết cho người chưa từng dùng Raspberry Pi: danh sách mua sắm kèm giá, loại ăng-ten nên chọn, vị trí đặt và suy hao cáp, chuẩn bị Pi, ba lệnh cài đặt phần mềm cấp dữ liệu Dataero, nhận quyền sở hữu trạm, tinh chỉnh độ khuếch đại, và năm phép đo, mỗi bài một phép, để kiểm chứng vật lý với bầu trời. Một trạm cấp dữ liệu cho Dataero mang lại cho lớp một bảng điều khiển, một bản đồ vùng phủ và một năm dữ liệu lịch sử để làm việc.

Mở buổi thực hành `https://radar.dataero.eu/vi/learning/workshop`