KHÓA HỌC THAM KHẢO - DÀNH CHO MỌI NGƯỜI LỚN

ADS-B là gì và hoạt động thế nào

Mười hai chương. Không cần kiến thức trước về hàng không hay vô tuyến; toán trung học là đủ cho các ví dụ có lời giải, và bạn có thể bỏ qua chúng mà không mất mạch. Thời gian đọc khoảng 50 phút.

Học - https://radar.dataero.eu/vi/learning/course 2026-11-21

MỤC LỤC

CHƯƠNG 1 Vấn đề: một bầu trời đầy máy bay mà không ai nhìn thấy
CHƯƠNG 2 Trước ADS-B: tìm máy bay bằng radar
CHƯƠNG 3 Ý tưởng: hãy để máy bay tự nói cho chúng ta
CHƯƠNG 4 Máy bay biết mình ở đâu bằng cách nào
CHƯƠNG 5 Cấu tạo của một bản tin
CHƯƠNG 6 - VẬT LÝ Sóng: vô tuyến là ánh sáng vô hình
CHƯƠNG 7 - VẬT LÝ Tầm thu: độ cong của Trái Đất và sự suy yếu của tín hiệu
CHƯƠNG 8 - VẬT LÝ Ăng-ten: bắt một làn sóng dài 27 xentimét
CHƯƠNG 9 Thu và giải mã
CHƯƠNG 10 Từ một máy thu đến bản đồ của cả một lục địa
CHƯƠNG 11 Nó được dùng vào việc gì, và còn thiếu sót ở đâu
CHƯƠNG 12 Lịch sử tóm lược
Thuật ngữ
TIẾP THEO Từ lý thuyết đến thực hành: lắp máy thu

CHƯƠNG 1

Vấn đề: một bầu trời đầy máy bay mà không ai nhìn thấy

Vào một ngày thường trong tuần, khoảng 30.000 chuyến bay đi qua không phận châu Âu. Một máy bay chở khách ở chế độ bay bằng di chuyển với tốc độ khoảng 250 mét mỗi giây, tức 900 km/h; hai máy bay bay về phía nhau sẽ tiến lại gần nhau nửa kilômét mỗi giây. Một phi công nhìn ra cửa sổ hầu như không thấy gì trong số đó: ở độ cao 10.000 mét, các máy bay khác chỉ là những chấm nhỏ, và dù sao mây cũng che khuất phần lớn. Bầu trời là một mạng lưới đường ba chiều không có vạch kẻ đường nào, và giao thông trên đó vừa nhanh vừa vô hình.

Kiểm soát không lưu tồn tại để giữ cho các phương tiện ấy cách xa nhau. Về nguyên tắc, các quy tắc rất đơn giản: trong vùng trời có kiểm soát, các máy bay được giữ cách nhau ít nhất 1.000 feet (khoảng 300 mét) theo chiều thẳng đứng, hoặc một khoảng cách ngang quy định, thường là 5 hải lý (9,3 km) ở nơi có radar phủ sóng và xa hơn nhiều khi bay trên đại dương. Để áp dụng các quy tắc đó, kiểm soát viên cần biết, liên tục và tin cậy, vị trí của mọi máy bay trong khu vực của mình: không phải nó ở đâu một phút trước, mà nó đang ở đâu ngay lúc này, bay cao bao nhiêu và đang đi về hướng nào. Toàn bộ chủ đề của khóa học này là cách có được hiểu biết đó. Thuật ngữ kỹ thuật cho việc này là **giám sát**.

Một con số cần ghi nhớ
Ở tốc độ 900 km/h, một máy bay đi được 15 km trong một phút và 250 m trong một giây. Bất kỳ phương pháp giám sát nào cập nhật chậm, hoặc có sai số lớn, đều khiến kiểm soát viên phải phỏng đoán đúng ở những khoảng cách quan trọng nhất.

CHƯƠNG 2

Trước ADS-B: tìm máy bay bằng radar

Lời giải đầu tiên, được phát triển vào cuối những năm 1930 và hoàn thiện trong Chiến tranh thế giới thứ hai, là **radar sơ cấp**. Một ăng-ten lớn xoay tròn phát ra một xung năng lượng vô tuyến ngắn và rất mạnh. Khi xung chạm vào một máy bay, một phần cực nhỏ của nó bị phản xạ trở lại. Radar đo thời gian từ lúc xung rời đi đến lúc tiếng vọng quay về; vì sóng vô tuyến đi với tốc độ ánh sáng, 300.000 km/s, nên thời gian cho biết khoảng cách. Hướng mà ăng-ten đang chĩa cho biết phương vị. Radar sơ cấp độc lập một cách tuyệt vời: máy bay không cần bất kỳ thiết bị nào, vì thế quân đội vẫn còn sử dụng nó. Nhưng nó có những điểm yếu thật sự. Tiếng vọng từ một máy bay ở xa yếu đến khó tin, nên máy phát phải cực lớn. Tiếng vọng không cho biết máy bay là chiếc nào hay đang bay cao bao nhiêu. Và ăng-ten mất vài giây để quay hết một vòng, nên mỗi máy bay chỉ được nhìn thấy một lần sau mỗi 4 đến 12 giây, trong khoảng thời gian đó nó đã di chuyển tới 3 km.

Lời giải thứ hai, **radar giám sát thứ cấp** (SSR), biến máy bay thành một bên tham gia. Một trạm mặt đất phát đi một câu hỏi, gọi là *lệnh hỏi*, trên tần số 1030 MHz. Một bộ vô tuyến nhỏ trên máy bay, **bộ phát đáp** (transponder), nghe câu hỏi và trả lời trên tần số 1090 MHz bằng một tín hiệu mạnh của chính nó. Vì câu trả lời được phát đi chứ không phải phản xạ lại, nó mạnh hơn tiếng vọng radar hàng triệu lần, và vì nó do máy tính tạo ra, nó có thể mang thông tin. Ở dạng cổ nhất (Mode A), câu trả lời chứa một mã nhận dạng bốn chữ số do kiểm soát viên cấp; ở Mode C, nó chứa thêm độ cao của máy bay. Vào những năm 1980 xuất hiện **Mode S** ("S" là selective, chọn lọc), trong đó mỗi bộ phát đáp có một địa chỉ 24 bit duy nhất, có thể được hỏi riêng lẻ, và có thể trả lời bằng các bản tin dữ liệu 56 hoặc 112 bit. Hãy ghi nhớ con số đó, 1090 MHz, và từ đó, Mode S: ADS-B được xây dựng trực tiếp trên cả hai.

Radar thứ cấp là một bước tiến lớn, nhưng nó vẫn có chung hai hạn chế với người tiền nhiệm. Máy bay chỉ nói khi được hỏi, nên mặt đất vẫn cần một trạm hỏi trong tầm phủ sóng, điều không thể ở đại dương, sa mạc và các dãy núi. Và trạm vẫn cần một ăng-ten xoay để biết câu trả lời đến từ hướng nào, nên mỗi máy bay vẫn chỉ được nhìn thấy một lần mỗi vòng quay, và màn hình của kiểm soát viên vẫn hiển thị một chấm nhảy cóc vài giây một lần chứ không phải một máy bay di chuyển mượt mà. Để làm tốt hơn, cần một điều khác hẳn về bản chất: một cách để máy bay báo vị trí của mình mà không cần được hỏi, và mặt đất không phải đo bất cứ thứ gì.

CHƯƠNG 3

Ý tưởng: hãy để máy bay tự nói cho chúng ta

Đến những năm 1990, hai công nghệ đã đủ chín muồi để có thể tiếp cận theo một cách khác. Dẫn đường vệ tinh cho mọi máy bay được trang bị phù hợp một hiểu biết chính xác về vị trí của chính nó, tốt hơn nhiều so với bất kỳ radar nào có thể đo từ mặt đất. Và bộ phát đáp Mode S đã cung cấp sẵn một bộ vô tuyến có thể gửi các bản tin dữ liệu trên tần số 1090 MHz. Ghép hai thứ lại với nhau và logic trở nên không

thể cưỡng lại: thay vì để mặt đất vất vả đo xem máy bay ở đâu, hãy để máy bay, vốn đã biết điều đó, chỉ đơn giản là nói ra, đều đặn, cho tất cả mọi người. Đó là ADS-B, và bốn từ trong tên gọi của nó là một mô tả chính xác.

Nó là **tự động** (automatic): không có gì kích hoạt một lần phát. Bộ phát đáp phát theo lịch riêng của nó, khoảng hai lần mỗi giây, dù có trạm mặt đất nào trong tầm hay không và dù phi công có làm gì hay không; thực tế phi công không thể dừng nó khi đang bay, trừ khi tắt bộ phát đáp, điều bị cấm. Nó là **phụ thuộc** (dependent): mọi thông tin trong bản tin đều đến từ thiết bị của chính máy bay, vị trí từ máy thu vệ tinh và độ cao từ đồng hồ đo độ cao khí áp, còn mặt đất không đo gì cả; nó tin vào những gì được báo. Nó là **giám sát** (surveillance): mục đích của nó là cho người khác biết máy bay đang ở đâu, phục vụ kiểm soát không lưu và các máy bay lân cận, khác với dẫn đường, tức là máy bay tự biết mình ở đâu, và khác với liên lạc, tức là nói chuyện với phi công. Và nó là **quảng bá** (broadcast): bản tin không có người nhận, không có xác nhận và không mã hóa, và bất kỳ ai có máy thu trong tầm đều nghe đúng cùng một nội dung, dù đó là một trung tâm kiểm soát, một máy bay chở khách khác hay một trường học.

"Phụ thuộc" là từ khiến các kỹ sư lo lắng và cũng là từ đáng được giải thích nhất. Radar thực hiện một phép đo độc lập: nếu thiết bị của máy bay sai, radar không bị ảnh hưởng. ADS-B thừa hưởng mọi sai số của hệ thống dẫn đường trên máy bay, và nếu hệ thống đó bị đánh lừa hoặc hỏng, vị trí được phát đi sẽ sai với cùng một sự tự tin. Đó là lý do mỗi bản tin ADS-B, bên cạnh vị trí, còn mang một tuyên bố về mức độ máy bay tin tưởng vào vị trí của chính nó (các hạng mục toàn vẹn và độ chính xác mà chúng ta sẽ gặp ở chương 5), và là lý do radar chưa bị tắt đi.

"Quảng bá" là từ làm cho khóa học này trở nên khả thi. Vì các bản tin được gửi đi không mã hóa cho tất cả mọi người, chúng không chỉ được kiểm soát không lưu nghe thấy mà còn bởi bất kỳ máy thu nào dò đúng tần số 1090 MHz, kể cả chiếc bạn có thể đặt trên mái trường. Chính đặc tính đó là nguồn gốc của hạn chế chính của hệ thống, được bàn ở chương 11: một bản tin ai cũng đọc được thì cũng là bản tin ai cũng có thể giả mạo.

CHƯƠNG 4

Máy bay biết mình ở đâu bằng cách nào

Mọi thứ trong ADS-B đều dựa trên việc máy bay biết vị trí của chính nó, vì vậy chương này nói về dẫn đường vệ tinh. Thuật ngữ chung là **GNSS**, Global Navigation Satellite System (hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu); GPS của Mỹ là hệ thống nổi tiếng nhất, còn Galileo của châu Âu, GLONASS của Nga và BeiDou của Trung Quốc hoạt động theo cùng nguyên lý. Mỗi hệ thống là một chòm khoảng 24 đến 30 vệ tinh quay quanh Trái Đất ở độ cao khoảng 20.000 km, cao hơn máy bay rất nhiều, mỗi vệ tinh mang một đồng hồ nguyên tử chính xác đến vài phần tỷ giây. Mỗi vệ tinh liên tục phát một tín hiệu vô tuyến mà về thực chất nói rằng "đây là vệ tinh số N, vị trí của tôi là thế này, và thời điểm tôi gửi tin này chính xác là T".

Máy thu trên máy bay nghe được tín hiệu đó muộn hơn một chút, vì sóng vô tuyến cần thời gian để truyền đi: với tốc độ 300.000 km/s, quãng đường 20.000 km từ vệ tinh mất khoảng 67 phần nghìn giây. Máy thu so sánh thời điểm ghi trong bản tin với thời điểm tín hiệu đến. Hiệu số đó, nhân với tốc độ ánh sáng, chính là khoảng cách tới vệ tinh. Một khoảng cách đặt máy thu ở đâu đó trên một mặt cầu bao quanh vệ tinh ấy. Hai mặt cầu giao nhau theo một đường tròn; ba mặt cầu giao nhau tại hai điểm, một trong hai thường là vô lý (sâu dưới lòng đất hoặc ở xa ngoài vũ trụ) và bị loại bỏ. Vậy ba vệ tinh là đủ, nếu máy thu có một chiếc đồng hồ hoàn hảo.

Nhưng nó không có. Một đồng hồ nguyên tử giá hàng chục nghìn euro và sẽ không vừa; máy thu chỉ có một đồng hồ thạch anh rẻ tiền, có thể sai lệch lớn hơn nhiều so với độ chính xác thời gian cần thiết. Đây là phần tinh tế. Máy thu coi sai số đồng hồ của chính nó là ẩn số thứ tư, bên cạnh ba tọa độ vị trí, và lắng nghe thêm một vệ tinh thứ tư. Bốn phương trình, bốn ẩn số: máy thu giải ra vị trí của mình và, như một sản phẩm phụ, hiệu chỉnh đồng hồ của chính nó đến độ chính xác vài chục nano giây. Đó là lý do một máy thu vệ tinh cần nhìn thấy ít nhất bốn vệ tinh, và là lý do mọi máy thu GNSS, một cách tình cờ, cũng là một trong những chiếc đồng hồ chính xác nhất trong tòa nhà.

Điều đáng dừng lại là các độ lớn, vì chúng giải thích tại sao dẫn đường vệ tinh thực chất là một bài toán đo thời gian, còn hình học chỉ là phần phụ. Ánh sáng đi được 30 xentimét trong một nano giây và 300 mét trong một micro giây, nên sai số thời gian một phần triệu giây trở thành sai số vị trí 300 mét, và độ chính xác vài mét của một máy thu hiện đại tương ứng với việc đo thời gian ở mức khoảng mười nano giây. Lấy một trường hợp cụ thể. Một vệ tinh đóng dấu thời gian 12:00:00.000 000 000 lên tín hiệu; máy thu trên máy bay nghe được nó lúc 12:00:00.070 000 000. Thời gian truyền là 0,070 s, nên khoảng cách là 0,070 x 300.000 km/s = 21.000 km. Nếu đồng hồ của máy thu chạy nhanh chỉ một micro giây, nó sẽ tính ra 21.000,3 km, xa hơn 300 mét, và cùng sai số đó cũng len vào khoảng cách tới mọi vệ tinh khác. Sai số chung ấy chính là thứ mà vệ tinh thứ tư phơi bày và loại bỏ.

Hai độ cao, không phải một

Vệ tinh cho độ cao so với bề mặt toán học của Trái Đất, tức độ cao *hình học*. Thế nhưng độ cao mà máy bay phát đi phục vụ không lưu lại không phải là độ cao đó. Đó là **độ cao khí áp**, được suy ra từ áp suất không khí bên ngoài máy bay, đo qua một lỗ nhỏ trên thân máy bay gọi là cổng tĩnh áp. Áp suất không khí giảm theo độ cao theo một quy luật đã biết (khoảng 1 hPa cho mỗi 8 mét ở gần mặt đất, chậm hơn khi lên cao), và mọi đồng hồ đo độ cao trên thế giới đều chuyển áp suất thành độ cao theo cùng một khí quyển tiêu chuẩn, lấy mốc 1013,25 hPa ở mực nước biển. Vào một ngày có áp suất bất thường, độ cao khí áp của mọi máy bay đều sai cùng một lượng, và đó chính là mấu chốt: điều quan trọng cho việc phân cách không phải là độ cao thực so với mặt biển, mà là hai máy bay cùng đọc "mực bay 350" thực sự cách 300 mét so với một máy bay đọc "mực bay 340". ADS-B phát độ cao khí áp trong các bản tin vị trí, theo các bước 25 feet (7,6 m), và phát riêng phần chênh lệch giữa độ cao đó với độ cao vệ tinh, để máy thu có thể khôi phục cả hai.

CHƯƠNG 5

Cấu tạo của một bản tin

Bản tin ADS-B mà các máy bay chở khách trên toàn thế giới sử dụng là một lần phát Mode S gọi là **extended squitter** (squitter mở rộng); "squitter" là tiếng lóng radar cũ chỉ một lần phát tự phát thay vì để trả lời, còn "mở rộng" vì với 112 bit nó dài gấp đôi câu trả lời Mode S ban đầu. Các kỹ sư viết "1090ES" thay cho "1090 MHz extended squitter". Mỗi lần phát kéo dài tổng cộng 120 micro giây: một *phần mở đầu* (preamble) dài 8 micro giây, là một mẫu cố định gồm bốn xung giúp máy thu nhận ra điểm bắt đầu của bản tin và đồng bộ đồng hồ của nó, tiếp theo là 112 bit dữ liệu với tốc độ một bit mỗi micro giây.

Một bit được gửi đi thế nào: điều chế vị trí xung

Mỗi khe bit dài một micro giây được chia làm hai nửa. Một xung năng lượng vô tuyến ở nửa đầu và im lặng ở nửa sau nghĩa là 1; im lặng rồi đến xung nghĩa là 0. Do đó luôn có đúng một xung cho mỗi bit, bất kể dữ liệu là gì, và máy thu chỉ cần quyết định nửa nào của mỗi khe to hơn. Phương pháp này, điều chế vị trí

xung, chịu được tốt các loại nhiễu và hiện tượng suy giảm mà tín hiệu gặp phải trên đường từ bộ phát đáp đến một ăng-ten ở xa, và giải mã rất rẻ.

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.

112 bit

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

Năm bit đầu tiên, định dạng đường xuống (downlink format), cho biết đây là loại bản tin Mode S nào; giá trị 17 nghĩa là "ADS-B từ một bộ phát đáp Mode S". **Địa chỉ ICAO** 24 bit là danh tính cố định của máy bay, được cấp khi nó được đăng ký: có 2 mũ 24, tức 16.777.216 địa chỉ khả dụng, được ICAO, cơ quan hàng không dân dụng của Liên Hợp Quốc, phân bổ theo khối cho các quốc gia. Chẳng hạn, máy bay của Bỉ mang các địa chỉ từ 448000 đến 44FFFF trong hệ thập lục phân. Khác với mã bốn chữ số của Mode A cũ, địa chỉ này không bao giờ thay đổi và không bao giờ dùng chung, nên máy thu có thể chắc chắn mình đang nghe máy bay nào ngay từ bản tin đầu tiên.

Trường **ME** 56 bit là nội dung thực sự, và năm bit đầu của nó, *mã loại* (type code), cho biết phần còn lại mang ý nghĩa gì. Các mã loại 1 đến 4 mang hô hiệu của máy bay, chẳng hạn BEL1234 hay RYR7KL, dưới dạng tám ký tự sáu bit. Các mã 9 đến 18 mang vị trí trên không kèm độ cao khí áp; 20 đến 22 cũng vậy nhưng kèm độ cao vệ tinh. Mã 19 mang vận tốc: tốc độ so với mặt đất được tách thành thành phần đông-tây và bắc-nam, tốc độ lên xuống, và chênh lệch giữa độ cao khí áp và độ cao vệ tinh. Các mã 28, 29 và 31 mang trạng thái: mã khẩn nguy, độ cao đã chọn, và các hạng mục toàn vẹn và độ chính xác cho biết vị trí được phát đi đáng tin đến mức nào (ví dụ một "NIC" bằng 8 cam kết rằng vị trí thật nằm trong phạm vi 185 m quanh vị trí được báo, với xác suất cao).

24 bit cuối cùng là một **mã kiểm tra dư vòng** (cyclic redundancy check), một con số được tính từ 88 bit đứng trước bằng một phép chia đa thức cố định. Máy thu lặp lại phép tính trên các bit nó đã giải mã; nếu kết quả không khớp, có ít nhất một bit đã bị hỏng trên đường truyền và bản tin bị loại bỏ. Vì một xung dài một micro giây rất dễ bị mất do nhiễu hoặc do một bản tin chồng lấn từ máy bay khác, phép kiểm tra này chính là thứ giữ cho các vị trí bị méo không xuất hiện trên màn hình của kiểm soát viên. Một bản tin thật, như một máy thu ghi lại, trông như sau:

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

8D: định dạng đường xuống 17, khả năng 5. 4840D6: địa chỉ ICAO, một máy bay của Hà Lan. 20...: mã loại 4, một bản tin nhận dạng, giải mã ra hô hiệu KLM1023. 576098: phần kiểm tra lỗi.

Gói cả Trái Đất vào 34 bit

Một bản tin vị trí chỉ có 17 bit cho vĩ độ và 17 bit cho kinh độ. Như vậy là 131.072 bước quanh cả địa cầu, mỗi bước khoảng 300 m ở xích đạo: còn xa mới đủ tốt. ADS-B giải quyết điều này bằng **báo cáo vị trí nén** (compact position reporting). Trái Đất được chia thành các vùng; 17 bit cho một vị trí rất chính xác (đến khoảng 5 m) trong một vùng, nhưng không cho biết là vùng nào. Máy bay luân phiên giữa hai lưới vùng hơi khác nhau, các bản tin "chẵn" và "lẻ", và một máy thu đã nghe được mỗi loại một bản tin có thể xác định vùng một cách chắc chắn. Khi đã xác định xong, chỉ một bản tin là đủ để theo dõi máy bay, vì nó khó có thể nhảy sang vùng khác trong nửa giây. Đây là một mẹo khéo léo giúp nhân đôi độ chính xác hữu ích mà không tốn thêm bit nào.

Bao lâu một lần

Khi đang bay, bộ phát đáp gửi một bản tin vị trí hai lần mỗi giây, một bản tin vận tốc hai lần mỗi giây, và hô hiệu năm giây một lần, cộng thêm các bản tin trạng thái ở khoảng cách thưa hơn, tổng cộng khoảng bốn đến năm extended squitter mỗi giây. Mỗi bản tin kéo dài 120 micro giây; thời gian bộ phát đáp thực sự phát ADS-B chưa đến một phần nghìn tổng thời gian. Phần còn lại của mỗi giây, nó lắng nghe và trả lời các lệnh hỏi radar trên tần số 1030 MHz và các truy vấn chống va chạm của những máy bay khác.

CHƯƠNG 6 - VẬT LÝ

Sóng: vô tuyến là ánh sáng vô hình

Bản tin rời máy bay dưới dạng một **sóng vô tuyến**, và ý tưởng hữu ích nhất trong khóa học này là sóng vô tuyến và tia sáng là cùng một thứ. Cả hai đều là sóng điện từ: một dạng điện trường và từ trường dao động cùng nhau và truyền trong không gian với tốc độ ánh sáng, c, bằng 299.792.458 mét mỗi giây, xấp xỉ 300.000 km/s. Điều phân biệt sóng vô tuyến với ánh sáng xanh lục, với tia X trong bệnh viện hay với vi sóng trong lò vi sóng nhà bếp chỉ là các trường dao động nhanh đến mức nào: **tần số**, f, đo bằng hertz (số dao động mỗi giây).

Vì sóng truyền với tốc độ cố định, tần số quyết định khoảng cách giữa đỉnh sóng này với đỉnh sóng kế tiếp, tức **bước sóng**, lambda. Trong một giây, sóng đi được c mét và hoàn thành f dao động, nên mỗi dao động chiếm c / f mét:

```
c = f x lambda
```

Với ADS-B: lambda = 300.000.000 / 1.090.000.000 = 0,275 m. Sóng giữa máy bay và ăng-ten của bạn có các đỉnh cách nhau 27,5 cm, gần bằng chiều dài một cây thước kẻ học sinh.

Sóng	Tần số	Bước sóng	Ghi chú
Phát thanh FM	100 MHz	3 m	Ăng-ten ô tô chỉ dài bằng một phần của bước sóng này
ADS-B / Mode S	1.090 MHz	27,5 cm	Cũng được dùng cho câu trả lời của bộ phát đáp radar
Điện thoại di động (băng tần 4G)	1.800 MHz	17 cm	Một người hàng xóm gần trong phổ tần
Wi-Fi, lò vi sóng	2.450 MHz	12 cm	Cùng tần số, công suất khác nhau rất xa

Sóng	Tần số	Bước sóng	Ghi chú
Ánh sáng xanh lục nhìn thấy được	560.000.000 MHz	0,00054 mm	Tần số cao hơn nửa triệu lần

Có hai hệ quả quan trọng cho mọi điều tiếp theo. Thứ nhất, vì sóng là ánh sáng, nó truyền theo đường thẳng trừ khi có gì đó bẻ cong hoặc chặn nó lại, và nó không đi xuyên qua Trái Đất. Điều đó quyết định tầm hoạt động của hệ thống, chủ đề của chương 7. Thứ hai, vì bước sóng của nó là 27,5 cm, các cấu trúc kim loại tương tác mạnh nhất với nó, tức các ăng-ten, có kích thước cỡ đó, chủ đề của chương 8.

Vì sao sóng vô tuyến không phải âm thanh

Nhầm lẫn phổ biến nhất, ở người lớn cũng như trẻ em, là giữa sóng vô tuyến và âm thanh, có lẽ vì "radio" là một chiếc hộp phát ra âm thanh. Đó là hai hiện tượng không liên quan gì đến nhau. Âm thanh là sóng áp suất trong không khí, một chuỗi các phân tử đẩy vào những phân tử bên cạnh; nó cần một môi trường vật chất để truyền, đi với tốc độ 340 m/s và không thể vượt qua chân không. Sóng vô tuyến không cần gì cả: nó vượt qua khoảng chân không giữa vệ tinh và máy bay, và đi nhanh hơn gần một triệu lần. Tiếng động cơ của máy bay và bản tin ADS-B của nó rời máy bay cùng một lúc; bản tin đến một máy thu cách 20 km sau 67 micro giây, còn âm thanh thì phải mất cả một phút.

Vì sao là 1090 MHz

Tần số này là một di sản. Các thỏa thuận quốc tế vào những năm 1950 đã dành băng tần từ 960 đến 1215 MHz cho vô tuyến dẫn đường hàng không, và 1090 MHz trở thành tần số trả lời của các bộ phát đáp radar thứ cấp. Khi ADS-B được thiết kế, việc tận dụng bộ phát đáp đã lắp sẵn trên mọi máy bay chở khách rẻ hơn rất nhiều so với lắp một bộ vô tuyến mới, nên ADS-B đơn giản trở thành thêm một điều mà bộ phát đáp Mode S nói trên tần số 1090 MHz. Tại Hoa Kỳ, các máy bay nhỏ bay dưới khoảng 5.500 m có thể dùng một hệ thống thứ hai thay thế, UAT trên tần số 978 MHz, vì thế các máy thu ở đó thường nghe cả hai.

CHƯƠNG 7 - VẬT LÝ

Tầm thu: độ cong của Trái Đất và sự suy yếu của tín hiệu

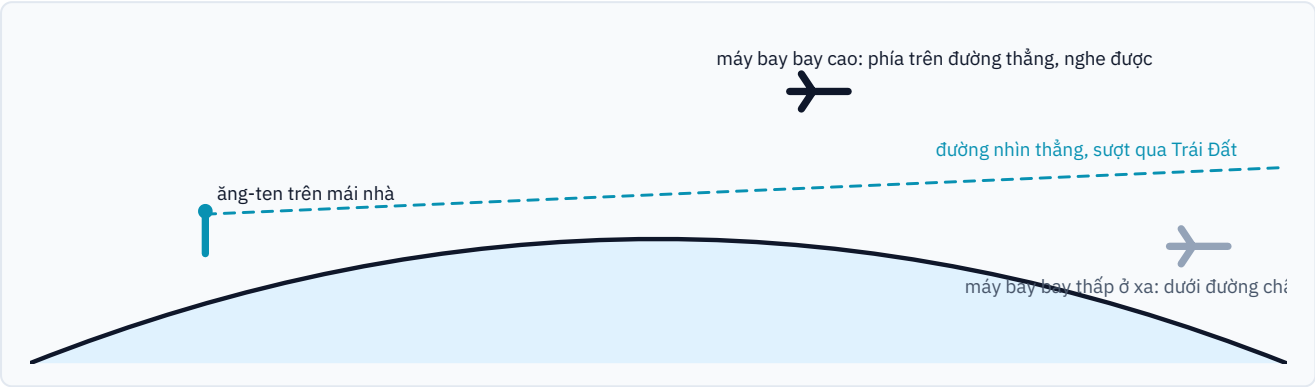
Một bộ phát đáp phát với công suất đỉnh vài trăm watt. Tín hiệu như vậy có thể được nghe từ xa đến đâu? Có hai yếu tố khá khác nhau giới hạn nó, và nên tách bạch chúng: hình học, đặt ra một ranh giới cứng, và công suất, đặt ra một ranh giới mềm.

Chân trời vô tuyến

Ở tần số 1090 MHz, sóng vô tuyến hành xử như ánh sáng: nó truyền theo đường thẳng và không uốn quanh Trái Đất. Vì vậy một ăng-ten mặt đất chỉ có thể nghe một máy bay khi giữa chúng có một đường thẳng không đi xuyên qua mặt đất. Với một người quan sát trên mặt đất, đường chân trời là nơi đường thẳng đó vừa sượt qua Trái Đất. Máy bay càng cao, điểm sượt đó càng xa; ăng-ten càng cao, nó lại càng xa hơn nữa. Hình học của một tiếp tuyến với mặt cầu cho một kết quả đơn giản: khoảng cách tới đường chân trời tính bằng kilômét xấp xỉ 3,57 lần căn bậc hai của độ cao tính bằng mét. Khí quyển bẻ cong sóng vô tuyến hơi hướng xuống dưới, làm đường chân trời xa thêm khoảng 15 phần trăm, nên các kỹ sư dùng hệ số 4,12:

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

Máy bay ở độ cao 11.000 m, ăng-ten trên mái nhà cao 20 m: 4,12 x (104,9 + 4,5) = 451 km. Máy bay ở độ cao 1.000 m, cùng mái nhà đó: 4,12 x (31,6 + 4,5) = 149 km. Máy bay trên mặt đất cách 15 km: hoàn toàn không nghe được, trừ khi vùng đất ở giữa bằng phẳng và trống trải.



Điều này giải thích hình dạng đặc trưng của vùng phủ sóng của một máy thu: một vòng tròn bán kính 400 km trở lên đối với các máy bay bay cao, thu hẹp xuống vài chục kilômét với máy bay đang tiếp cận hạ cánh, và gần như không có gì với máy bay trên mặt đất, trừ ở sân bay ngay bên cạnh. Nó cũng giải thích vì sao độ cao của máy thu quan trọng hơn nhiều so với chất lượng máy thu, và vì sao một ngọn đồi, một tòa nhà cao hay thậm chí chính cánh của máy bay, khi nó nghiêng cánh rẽ ra xa bạn, có thể cắt đứt tín hiệu ngay lập tức.

Định luật nghịch đảo bình phương

Bên trong đường chân trời, tín hiệu yếu dần theo khoảng cách. Ăng-ten của bộ phát đáp bức xạ ra mọi hướng nằm ngang, nên công suất của nó trải ra trên một mặt cầu ngày càng lớn. Diện tích mặt cầu tăng theo bình phương bán kính, nên công suất rơi vào một ăng-ten có kích thước cố định giảm theo bình phương khoảng cách: xa gấp đôi, còn một phần tư công suất; xa gấp mười, còn một phần trăm. Các kỹ sư biểu diễn điều này bằng *suy hao đường truyền* tính theo decibel, và ở tần số 1090 MHz trên quãng đường 400 km, nó vào khoảng 145 dB, nghĩa là công suất thu được nhỏ hơn công suất phát khoảng 10 mũ 14,5 lần. Một xung 250 watt khi đến nơi chỉ còn khoảng một phần mười của một phần tỷ miliwatt. Một máy thu tốt có thể phát hiện được mức đó, vừa đủ, và đó là lý do đường chân trời hình học và giới hạn công suất tình cờ trùng nhau ở khoảng vài trăm kilômét: hệ thống được thiết kế như vậy.

Hai giới hạn này tác động lẫn nhau theo một cách đáng để hiểu. Bên trong đường chân trời, cả tín hiệu mạnh từ một máy bay gần lẫn tín hiệu yếu từ một máy bay xa đều được giải mã hoàn hảo, vì phương pháp vị trí xung ở chương 5 chỉ hỏi nửa nào của mỗi khe bit to hơn, chứ không hỏi to bao nhiêu. Tín hiệu không mất dần tính hữu dụng khi máy bay đi xa; nó vẫn giải mã được cho đến khi, ở đâu đó gần đường chân trời, hoặc hình học cắt đứt nó, hoặc nhiễu trong máy thu cuối cùng nhấn chìm nó, và đường bay dừng lại. Đó là lý do các bản đồ vùng phủ sóng có đường biên sắc nét, và vì sao những máy bay xa nhất mà một máy thu nghe được hầu như luôn là những chiếc bay cao nhất.

CHƯƠNG 8 - VẬT LÝ

Ăng-ten: bắt một làn sóng dài 27 xentimét

Ăng-ten là một vật dẫn được tạo hình sao cho một sóng điện từ đi qua làm các electron trong nó chuyển động đồng nhịp, tạo ra một dòng điện xoay chiều cực nhỏ mà máy thu có thể khuếch đại. Điều ngược lại xảy ra ở máy phát: một dòng điện xoay chiều trong ăng-ten của máy bay phóng ra sóng. Hiệu suất của sự trao đổi này phụ thuộc vào kích thước của vật dẫn so với bước sóng. Một sợi dây thẳng đáp ứng mạnh nhất, nó *cộng hưởng*, khi dài bằng nửa bước sóng, để dòng điện dao động qua lại dọc theo nó khớp chính xác với dao động của sóng, giống như một chiếc xích đu của trẻ con được đẩy đúng nhịp tự nhiên của nó. Với tần số 1090 MHz, nửa bước sóng là 13,75 cm.

Dạng thực tế phổ biến nhất là **ăng-ten đơn cực một phần tư bước sóng**: một thanh thẳng đứng dài một phần tư bước sóng, 6,9 cm, dựng trên một bề mặt dẫn điện, gọi là *mặt phẳng đất* (ground plane). Mặt phẳng đất hoạt động như một tấm gương, nên thanh và ảnh phản chiếu của nó cùng nhau hoạt động như một ăng-ten nửa bước sóng. Đó là lý do ăng-ten ADS-B trên máy bay là một cái vây ngắn chỉ cao vài xentimét trên thân máy bay, thân máy bay chính là mặt phẳng đất, và vì sao ăng-ten của người chơi nghiệp dư là một đoạn dây ngắn trên nắp hộp thiếc. Một sợi dây sai chiều dài vẫn hoạt động, nhưng kém hơn nhiều: "chiếc tai kim loại" được tinh chỉnh theo tần số.

Ba đặc tính nữa của ăng-ten suy ra từ vật lý, và mỗi đặc tính đều có một hệ quả thấy được. Thứ nhất là **sự phân cực**. Điện trường của một sóng điện từ dao động theo một hướng xác định vuông góc với phương truyền, và ăng-ten chỉ đáp ứng với thành phần của trường dọc theo chiều dài của chính nó. Ăng-ten máy bay được lắp thẳng đứng, nên sóng ADS-B đến với phân cực thẳng đứng, và ăng-ten thu cũng phải thẳng đứng; đặt nằm ngang, nó hầu như không nghe thấy gì, giống như một làn sóng trên sợi dây được lắc lên xuống sẽ bị chặn lại bởi một khe nằm ngang. Thứ hai là **giản đồ bức xạ**. Một ăng-ten thẳng đứng nhạy nhất theo hướng chân trời và hoàn toàn không nhạy dọc theo trục của chính nó, nên độ nhạy của nó trong không gian ba chiều có hình một chiếc bánh vòng (donut) với ăng-ten xuyên qua lỗ giữa. Vì vậy các máy thu thường nghe các máy bay cách 300 km mà không gặp khó khăn gì nhưng lại mất một chiếc bay ngay trên đầu trong vài giây, một điều đáng để ý trên bất kỳ bản đồ trực tiếp nào. Xếp chồng nhiều phần tử cộng hưởng lên nhau sẽ ép chiếc bánh vòng dẹt hơn, dồn độ nhạy về phía chân trời, nơi có các máy bay ở xa, và đánh đổi phía trên đầu; đó là ý nghĩa của **độ lợi** ăng-ten, và nó luôn là sự phân bổ lại độ nhạy, không bao giờ là tạo ra độ nhạy.

Đặc tính thứ ba liên quan đến những gì nằm giữa ăng-ten và máy thu. Ăng-ten không chỉ bắt được tần số 1090 MHz mà mọi tín hiệu xung quanh, kể cả các tín hiệu điện thoại di động cách vài trăm megahertz nhưng mạnh hơn rất nhiều, vì thế một bộ lọc chỉ cho băng tần hàng không đi qua được đặt đầu tiên. Sau đó tín hiệu phải đi qua một sợi cáp, và ở tần số 1090 MHz, cáp đồng trục làm mất khoảng một nửa tín hiệu sau mỗi mười mét; cách khắc phục là đặt một bộ khuếch đại tạp âm thấp ngay tại ăng-ten, trước sợi cáp, để tín hiệu đủ mạnh mà vượt qua hành trình, thay vì đặt tại máy thu, nơi việc khuếch đại sẽ khuếch đại cả tạp âm của cáp cùng với phần tín hiệu còn lại. Đây là những chi tiết, nhưng chính chúng quyết định việc một máy thu trên mái trường nghe được máy bay ở tận đường chân trời hay chỉ những chiếc ở gần.

CHƯƠNG 9

Thu và giải mã

Giữa ăng-ten và một chấm trên bản đồ là một chuỗi gồm năm công đoạn. Ăng-ten biến làn sóng đi qua thành một dòng điện xoay chiều vài micro vôn. Một bộ lọc và một bộ khuếch đại tạp âm thấp giữ lại băng tần 1090 MHz, loại bỏ mọi thứ khác và nâng tín hiệu lên gấp nghìn lần. Một bộ vô tuyến định nghĩa bằng phần mềm dò đến tần số đó và lấy mẫu tín hiệu hai triệu lần mỗi giây, biến nó thành một dòng số. Một bộ giải mã tìm kiếm mẫu phần mở đầu trong dòng số đó, đọc ra 112 bit, kiểm tra tính chẵn lẻ và giải mã các trường. Và một bộ theo dõi gom các bản tin của mỗi máy bay thành một bản ghi duy nhất, được cập nhật liên tục: một vị trí, một đường bay, một nhãn.

Công đoạn đáng chú ý là công đoạn thứ ba. Cho đến khoảng năm 2010, việc giải mã tần số 1090 MHz cần phần cứng chuyên dụng giá hàng nghìn euro. Rồi những người chơi nghiệp dư phát hiện rằng một chiếc USB thu truyền hình giá 20 euro chứa một con chip có thể được yêu cầu dò đến bất kỳ tần số nào và chuyển tín hiệu thô cho máy tính. **Vô tuyến định nghĩa bằng phần mềm** (SDR) này biến bài toán vô tuyến thành một bài toán lập trình: một máy tính xách tay hay một Raspberry Pi nhận một dòng hai triệu con số mỗi giây mô tả cường độ tín hiệu, và phần mềm miễn phí tìm mẫu phần mở đầu, đo xem nửa nào của mỗi khe micro giây to hơn, ghép lại 112 bit, tính CRC và in ra các trường. Dự án máy thu trong bộ tài liệu trung học chính là chuỗi này, và một trường học có thể lắp nó với chi phí dưới 100 euro.

Công đoạn theo dõi là nơi dòng bản tin trở thành hiểu biết. Hãy nhớ rằng một bản tin vị trí đơn lẻ là mơ hồ cho đến khi một bản tin chẵn và một bản tin lẻ được ghép đôi. Vận tốc đến tách biệt với vị trí, hô hiệu lại đến riêng nữa, và bộ theo dõi khâu chúng lại với nhau theo địa chỉ ICAO, loại bỏ mọi thứ không qua được phép kiểm tra lỗi, và lưu trạng thái đã biết gần nhất của mỗi máy bay. Nếu không có bản tin nào đến trong một phút, thường là vì máy bay đã xuống dưới đường chân trời, đường bay hết hạn.

CHƯƠNG 10

Từ một máy thu đến bản đồ của cả một lục địa

Một máy thu nghe được một vòng tròn bầu trời có đường kính vài trăm kilômét. Một bản đồ châu Âu cần hàng trăm máy thu như vậy, và những máy hữu ích nhất không nằm trong thành phố mà trải rộng ra: trên bờ biển, trong thung lũng, trên đảo, ở bất cứ nơi nào vòng tròn của máy thu khác không vươn tới. Mỗi máy thu gửi các bản tin đã giải mã, mỗi bản tin được đóng dấu thời điểm đến, qua internet tới một dịch vụ trung tâm. Dịch vụ đó *tổng hợp*: cùng một bản tin từ một máy bay bay cao thường đến từ mười hay hai mươi máy thu cùng lúc, và các bản trùng lặp phải được nhận ra và gộp lại. Nó cũng kiểm tra: một vị trí mâu thuẫn với cách nhìn của mọi máy thu lân cận về cùng chiếc máy bay đó nhiều khả năng là lỗi giải mã hoặc do bộ phát đáp bị lỗi, và sẽ bị đánh dấu hoặc loại bỏ.

Định vị đa điểm: tìm những máy bay không cho biết mình ở đâu

Không phải máy bay nào cũng phát vị trí. Các bộ phát đáp cũ trả lời radar bằng danh tính và độ cao nhưng không có đầu vào vệ tinh; một số máy bay cố ý không gửi vị trí. Thế nhưng các lần phát trên tần số 1090 MHz của chúng vẫn đến được mặt đất, và một mạng lưới có thể định vị chúng bằng cách lộn ngược nguyên lý dẫn đường vệ tinh. Nếu bốn máy thu có đồng hồ được đồng bộ chính xác, mỗi máy ghi lại thời điểm cùng một lần phát đến nơi, thì chênh lệch giữa các thời điểm đó cho biết chênh lệch về khoảng cách: một bản tin đến máy thu A sớm hơn máy thu B một micro giây đã được gửi từ một điểm gần A hơn gần B 300 m. Mọi điểm có tính chất đó nằm trên một mặt cong, một hyperboloid, giữa A và B. Ba mặt như vậy, từ

bốn máy thu, giao nhau tại máy bay. Đó là **định vị đa điểm** (multilateration, MLAT), và nó đòi hỏi đo thời gian chính xác đến khoảng một phần mười micro giây, tức 30 m, giữa các máy thu cách nhau hàng trăm kilômét, độ chính xác mà các máy thu có được từ chính những vệ tinh mà máy bay sử dụng.

Cùng một ý tưởng, hai lần
Dẫn đường vệ tinh: một máy thu, bốn máy phát đã biết vị trí, giải ra vị trí máy thu. Định vị đa điểm: một máy phát, bốn máy thu đã biết vị trí, giải ra vị trí máy phát. Trong cả hai trường hợp, thứ thực sự được đo là thời gian, và 1 micro giây là 300 mét.

CHƯƠNG 11

Nó được dùng vào việc gì, và còn thiếu sót ở đâu

Kiểm soát không lưu là khách hàng đầu tiên. Trên khắp châu Âu, các kiểm soát viên giờ đây nhìn thấy một bức tranh hợp nhất, trong đó ADS-B, với tốc độ cập nhật hai lần mỗi giây và độ chính xác cấp vệ tinh, được kết hợp với radar và định vị đa điểm; ở những nơi radar chưa bao giờ vươn tới, trên Bắc Đại Tây Dương, Bắc Cực, sa mạc Sahara và phần lớn các đại dương, bản tin ADS-B được thu bởi các máy thu đặt trên vệ tinh liên lạc quỹ đạo thấp, điều đã cho phép các máy bay bay qua Đại Tây Dương được bố trí gần nhau hơn nhiều so với trước. Máy bay là khách hàng thứ hai: một máy bay chở khách có "ADS-B In" hiển thị các máy bay lân cận cho tổ lái và đưa dữ liệu vào hệ thống chống va chạm. Các sân bay dùng nó để theo dõi máy bay và xe cộ trên mặt đất khi có sương mù. Các nhà nghiên cứu dùng dữ liệu mở để nghiên cứu tiếng ồn, mức tiêu thụ nhiên liệu, vệt ngưng tụ và sự chậm trễ. Và một máy thu trên mái trường, ở một mức độ nhỏ, cũng là một bên tham gia vào tất cả những điều đó.

Các điểm yếu của hệ thống xuất phát trực tiếp từ thiết kế của nó, và mỗi điểm đều đáng để hiểu chứ không chỉ để liệt kê. Vì các bản tin được phát đi công khai, không mã hóa cũng không ký số, nên không có gì trong bản thân một bản tin chứng minh rằng nó đến từ một máy bay. Một máy phát trên mặt đất có thể, một cách bất hợp pháp, phát đi một bản tin đúng định dạng hoàn hảo mô tả một chiếc máy bay không hề tồn tại, và máy thu sẽ giải mã nó mà không phàn nàn gì. Thứ bảo vệ hệ thống không phải là bản tin mà là bối cảnh xung quanh nó: một bóng ma sẽ không xuất hiện trên radar, sẽ không được định vị đa điểm tìm thấy, và sẽ không hành xử như máy bay thật, và các trung tâm kiểm soát liên tục đối chiếu chéo. Một phiên bản giao thức có chữ ký mật mã đã được bàn đến trong nhiều năm; trở ngại không nằm ở kỹ thuật bằng ở thực tiễn, vì mọi bộ phát đáp trên thế giới sẽ phải thay đổi.

Vì vị trí phụ thuộc vào máy thu vệ tinh của máy bay, bất cứ điều gì làm nhiễu dẫn đường vệ tinh cũng làm nhiễu ADS-B. Việc gây nhiễu (jamming) và giả mạo (spoofing) tín hiệu vệ tinh đã trở nên phổ biến gần các vùng xung đột, và một máy bay bay qua khu vực như vậy có thể không tính được vị trí, hoặc tính ra một vị trí sai. Khi đó các bản tin của nó mang một hạng mục toàn vẹn bị suy giảm, hệ thống của kiểm soát viên đánh dấu chúng, và radar, phép đo độc lập mà ADS-B chưa bao giờ được dự định thay thế hoàn toàn, sẽ đảm nhận. Vì thế mối quan hệ giữa hai hệ thống không phải là người kế nhiệm và người tiền nhiệm, mà là những đối tác có điểm yếu bổ sung cho nhau.

Vì quy định bắt buộc áp dụng cho máy bay chở khách và phần lớn máy bay cỡ lớn nhưng không phải cho mọi thứ biết bay, bản đồ được thiết kế là không đầy đủ. Máy bay hạng nhẹ bay ngoài vùng trời có kiểm soát, tàu lượn, khinh khí cầu và nhiều máy bay quân sự có thể hoàn toàn không mang ADS-B, và một số máy bay hạng nhẹ dùng các hệ thống khác mà máy thu 1090 MHz không nghe được. Và vì bản tin quảng

bá cho biết danh tính máy bay, nó có thể cho biết danh tính chủ sở hữu: theo dõi một chiếc máy bay phản lực tư nhân cụ thể, về thực chất, là theo dõi một con người cụ thể, điều đã dẫn đến các chương trình che giấu số đăng ký của những máy bay mà chủ sở hữu yêu cầu, và đến một cuộc tranh luận vẫn đang tiếp diễn về việc liệu thông tin mà một máy bay phát cho cả thế giới có thể đồng thời là thông tin riêng tư hay không. Đó là một câu hỏi hay để đặt ra cho học sinh lớn, vì vật lý không đưa ra câu trả lời cho nó.

CHƯƠNG 12

Lịch sử tóm lược

> ### 1935 đến 1945
> Radar sơ cấp được phát triển ở Anh, Đức và Hoa Kỳ; đến cuối chiến tranh, các bộ phát đáp "nhận dạng địch ta" (IFF) trả lời xung radar bằng một câu trả lời được mã hóa, tổ tiên của radar thứ cấp.
>
> ### Thập niên 1950 đến 1960
> Radar thứ cấp dân dụng được tiêu chuẩn hóa: lệnh hỏi trên 1030 MHz, câu trả lời trên 1090 MHz, mã nhận dạng Mode A và độ cao Mode C.
>
> ### Thập niên 1980
> Mode S, với địa chỉ 24 bit duy nhất và các bản tin dữ liệu, được phát triển tại Phòng thí nghiệm Lincoln của MIT và được ICAO thông qua. GPS bắt đầu hoạt động cho người dùng dân sự.
>
> ### Thập niên 1990 đến 2000
> ADS-B được định nghĩa và thử nghiệm, đáng chú ý là ở Alaska, nơi không thể phủ sóng radar và tai nạn xảy ra thường xuyên. Extended squitter trên 1090 MHz được tiêu chuẩn hóa quốc tế.
>
> ### Thập niên 2010
> Các bộ vô tuyến định nghĩa bằng phần mềm giá rẻ biến việc thu tín hiệu thành một thú chơi; các mạng lưới tình nguyện gồm hàng nghìn máy thu xuất hiện. Các máy thu được phóng lên vệ tinh để phủ sóng các đại dương.
>
> ### 2020
> ADS-B trở thành bắt buộc với phần lớn máy bay trong vùng trời có kiểm soát tại Hoa Kỳ (tháng Một) và Liên minh châu Âu (tháng Sáu, với giai đoạn chuyển tiếp đến cuối năm). Bầu trời bắt đầu lên tiếng, ở khắp nơi, mọi lúc.

Thuật ngữ

ADS-B
Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (giám sát phụ thuộc tự động - quảng bá). Máy bay tự phát vị trí của chính mình.

Độ cao khí áp
Độ cao suy ra từ áp suất không khí, theo một khí quyển tiêu chuẩn; là độ cao mà máy bay báo cáo.

CPR
Compact position reporting (báo cáo vị trí nén), phương pháp chẵn/lẻ gói một vị trí chính xác vào 34 bit.

CRC
Cyclic redundancy check (mã kiểm tra dư vòng), phần kiểm tra lỗi 24 bit ở cuối mỗi bản tin.

Squitter mở rộng (Extended squitter)
Lần phát Mode S tự phát dài 112 bit mang ADS-B.

GNSS
Hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou.

Địa chỉ ICAO
Danh tính 24 bit cố định của bộ phát đáp trên máy bay.

Mode S
Tiêu chuẩn radar thứ cấp chọn lọc làm nền tảng cho ADS-B.

Định vị đa điểm
Xác định vị trí một máy phát từ chênh lệch thời gian tín hiệu đến tại nhiều máy thu.

Suy hao đường truyền
Sự suy yếu của tín hiệu theo khoảng cách, tuân theo định luật nghịch đảo bình phương.

Chân trời vô tuyến
Khoảng cách xa nhất mà tại đó đường thẳng giữa ăng-ten và máy bay vẫn không bị Trái Đất che.

SDR
Software-defined radio (vô tuyến định nghĩa bằng phần mềm): một bộ thu chuyển các mẫu tín hiệu thô cho máy tính giải mã.

SSR
Secondary surveillance radar (radar giám sát thứ cấp): mặt đất hỏi, bộ phát đáp trả lời.

Bộ phát đáp
Bộ vô tuyến trên máy bay trả lời radar và phát ADS-B trên tần số 1090 MHz.

Bước sóng
Khoảng cách giữa hai đỉnh sóng liên tiếp: c / f, bằng 27,5 cm ở tần số 1090 MHz.

TIẾP THEO

Từ lý thuyết đến thực hành: lắp máy thu

Mười hai chương đã giải thích một hệ thống mà giờ đây bạn có thể cầm trong tay. Phần thực hành biến chúng thành công việc của một buổi chiều: mua gì với 100 đến 150 euro, cách làm và đặt ăng-ten, cách chuẩn bị Raspberry Pi và cài đặt phần mềm cấp dữ liệu (feeder) của Dataero, và cách xem những máy bay bạn nghe được hiện lên trên bản đồ trực tiếp, được ghi nhận cho trạm của bạn. Mỗi chương ở trên đều có một phép đo đang chờ nó ở đó: chân trời vô tuyến so với máy bay thật, định luật nghịch đảo bình phương trong cột tín hiệu, nhịp sinh hoạt hằng ngày của bầu trời.

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