VẬT LÝ VÀ TIN HỌC - TỪ 12 ĐẾN 18 TUỔI

Giải mã bầu trời

Dòng số thập lục phân bên dưới là một bản tin thật, do một chiếc máy bay thật phát đi khoảng hai lần mỗi giây. Chỉ trong 112 phần triệu giây, nó cho biết máy bay là chiếc nào, và trong các bản tin đi kèm, máy bay đang ở đâu, bay cao bao nhiêu và nhanh đến mức nào. Khóa học này đi qua mọi thứ bạn cần để hiểu nó: vật lý của sóng mang bản tin, phép đo thời gian giúp máy bay biết vị trí của mình, cách mã hóa gói tất cả vào 112 bit, hình học giới hạn khoảng cách có thể nghe được, và chiếc máy thu bạn có thể tự lắp để tự mình nghe.

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

MỤC LỤC

ADS-B là gì, gói gọn trong một trang
BÀI 1 Sóng: radio là ánh sáng vô hình
BÀI 2 Thời gian và vị trí: máy bay biết mình ở đâu bằng cách nào
BÀI 3 Bản tin: 112 bit, và cách phát hiện lỗi
BÀI 4 Tầm thu: độ cong của Trái Đất và định luật nghịch đảo bình phương
BÀI 5 Ăng-ten và máy thu: từ một sóng 27 centimét đến một chấm trên bản đồ
Thử thách
TIẾP THEO Tự lắp ráp

ADS-B là gì, gói gọn trong một trang

> 8D **4840D6** 202CC371C32CE0 576098
>
> Một squitter mở rộng đúng như máy thu ghi lại: 28 chữ số thập lục phân, 112 bit. Đến bài 3, bạn sẽ đọc được từng trường của nó.

Kiểm soát không lưu phải luôn biết từng máy bay đang ở đâu để giữ chúng cách xa nhau: một máy bay chở khách ở độ cao bay bằng đi được 250 m mỗi giây, và quy tắc phân cách yêu cầu 300 m theo phương thẳng đứng hoặc 9 km theo phương ngang giữa các máy bay được kiểm soát bằng radar. Suốt bảy mươi năm, cách để biết là radar: một trạm mặt đất phát đi một xung và đo thời gian tiếng vọng quay về, hoặc ở dạng cải tiến gọi là radar thứ cấp, nó hỏi một bộ phát đáp trên máy bay, bộ này trả lời trên tần số 1090 MHz bằng mã nhận dạng và độ cao. Radar có những giới hạn: nó cần công suất cực lớn, mỗi vòng quay ăng-ten nó chỉ thấy mỗi máy bay một lần, và nó không thể phủ sóng đại dương hay vùng núi.

ADS-B, viết tắt của Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (giám sát phụ thuộc tự động - quảng bá), lật ngược vấn đề. Mỗi máy bay hiện đại đều mang một máy thu định vị vệ tinh, vì vậy nó tự biết vị trí của mình chính xác đến vài mét. ADS-B chỉ đơn giản là để bộ phát đáp của máy bay thông báo vị trí đó, cùng với mã nhận dạng, độ cao và vận tốc, khoảng hai lần mỗi giây, trên tần số 1090 MHz, cho bất kỳ ai. Tự động vì không có gì kích hoạt nó; phụ thuộc vì thông tin hoàn toàn đến từ thiết bị của chính máy bay; giám sát vì mục đích của nó là biết máy bay đang ở đâu; quảng bá vì nó được phát công khai cho bất kỳ ai

đang nghe. Từ năm 2020, ADS-B là bắt buộc với hầu hết máy bay trong vùng trời châu Âu và châu Mỹ. Kiểm soát viên dùng nó song song với radar, các máy bay khác dùng nó để nhìn thấy nhau, và một máy thu USB giá 25 euro đặt trên mái trường nghe được đúng những bản tin đó.

Để hiểu hệ thống, bạn cần hiểu năm điều, và mỗi điều là một bài học: sóng điện từ mang bản tin; phép đo thời gian giúp máy bay biết vị trí, và giúp một mạng lưới tìm ra một máy bay không chịu cho biết mình ở đâu; bản tin số và cách phát hiện lỗi trong nó; hình học và năng lượng giới hạn khoảng cách có thể nghe được; và ăng-ten cùng máy thu biến nó trở lại thành dữ liệu. Toàn bộ câu chuyện nằm trong khóa học tham khảo; hãy đọc chương 3 và 5 của nó trước bài 3, và chương 6 đến 8 trước bài 4 và 5.

BÀI 1

Sóng: radio là ánh sáng vô hình

Bản tin rời máy bay dưới dạng một sóng điện từ: điện trường và từ trường dao động lan truyền trong không gian mà không cần môi trường nào, với tốc độ ánh sáng c = 3.00 x 10^8 m/s. Ánh sáng nhìn thấy cũng là hiện tượng đó ở tần số cao hơn; mắt bạn cảm nhận được khoảng 4 đến 8 x 10^14 Hz, còn ADS-B được phát ở 1.09 x 10^9 Hz, thấp hơn nửa triệu lần. Bản tin của máy bay và ánh sáng từ màn hình này không khác nhau về bản chất, chỉ khác về tần số.

Vì sóng truyền với tốc độ cố định, tần số của nó quyết định bước sóng. Trong một giây, sóng đi được c mét và thực hiện f chu kỳ, nên mỗi chu kỳ chiếm c / f mét: c = f x lambda. Với ADS-B, lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. Sóng truyền giữa máy bay và ăng-ten của bạn có các đỉnh cách nhau 27.5 cm, nằm giữa tín hiệu điện thoại di động (17 cm) và một đài phát thanh FM (3 m) trên phổ. Hãy tự vẽ phổ đó trên một trục logarit từ 10^6 Hz đến 10^18 Hz, rồi đặt lên đó radio FM, ADS-B, điện thoại di động, Wi-Fi, tia hồng ngoại, ánh sáng nhìn thấy và tia X. Sóng của máy bay nằm giữa những thứ trong túi bạn.

$$c = f \times \lambda$$

$$3.00 \times 10^8 \text{ m/s} = 1.09 \times 10^9 \text{ Hz} \times 0.275 \text{ m}$$

Sóng radio không phải là âm thanh. Âm thanh là sóng áp suất trong một môi trường, truyền với tốc độ 343 m/s trong không khí, 1 500 m/s trong nước, và hoàn toàn không truyền được trong chân không. Radio là ánh sáng: nó không cần môi trường, đó là cách nó vượt qua chân không từ vệ tinh đến máy bay, và nó nhanh hơn 3.00 x 10^8 / 343 lần, tức khoảng 875 000 lần. Nếu một máy bay cách 30 km phát ra một âm thanh và một bản tin cùng lúc, bản tin đến sau 100 micro giây; âm thanh đến sau 87 giây, khi đó máy bay đã bay thêm 22 km. Sóng trên sợi dây có chung với ánh sáng những tính chất quan trọng, gồm bước sóng, tần số và tốc độ cố định, nên rung nhanh hơn tạo ra sóng ngắn hơn chứ không phải sóng nhanh hơn; nó chỉ khác ở chỗ cần có sợi dây.

Một tính chất của sóng sẽ quan trọng ở bài 5: sự phân cực. Điện trường dao động theo một phương xác định, vuông góc với phương truyền. Ăng-ten của máy bay đặt thẳng đứng, nên sóng ADS-B phân cực thẳng đứng, và một ăng-ten thu đặt nằm ngang gần như không bắt được gì, giống như sóng trên sợi dây rung theo phương thẳng đứng bị chặn lại bởi một khe nằm ngang. Hãy dự đoán ngay bây giờ điều gì sẽ xảy ra với tầm thu của máy thu nếu ăng-ten nằm ngang; bạn sẽ kiểm tra điều đó trong dự án.

BÀI 2

Thời gian và vị trí: máy bay biết mình ở đâu bằng cách nào

Vị trí trong mỗi bản tin ADS-B đến từ định vị vệ tinh, và định vị vệ tinh là một phép đo thời gian. Mỗi hệ thống (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) có khoảng ba mươi vệ tinh bay quanh quỹ đạo ở độ cao khoảng 20 200 km, mỗi vệ tinh 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 trên máy bay ghi lại thời điểm tín hiệu đến. Hiệu số đó nhân với c là khoảng cách đến vệ tinh; từ ngay trên đỉnh đầu, tín hiệu mất 20 200 / 300 000 = 0.0673 s. Một khoảng cách đặt máy thu lên một mặt cầu quanh vệ tinh đó; hai mặt cầu cắt nhau theo một đường tròn; ba mặt cầu cắt nhau tại hai điểm, một điểm nằm xa Trái Đất và bị loại bỏ. Ba vệ tinh là đủ nếu máy thu có một đồng hồ hoàn hảo. Nhưng nó chỉ có một tinh thể thạch anh bị trôi vài micro giây, mà một micro giây tương ứng với 300 m khoảng cách. Vì vậy máy thu coi sai số đồng hồ của chính nó là ẩn số thứ tư và dùng thêm một vệ tinh thứ tư: bốn phương trình, bốn ẩn số (x, y, z và độ lệch đồng hồ), được giải liên tục. Như một kết quả phụ, mọi máy thu vệ tinh đều giữ giờ chính xác đến vài chục nano giây, và nửa sau của bài học này dựa vào điều đó.

Hãy nhớ các độ lớn: ánh sáng đi được 0.3 m mỗi nano giây và 300 m mỗi micro giây. Một vị trí chính xác đến 3 m nghĩa là đo thời gian chính xác đến 10 ns. Một vệ tinh có đồng hồ chạy nhanh 1 micro giây sẽ đẩy mọi máy thu dùng nó lệch 300 m dọc theo đường hướng về phía nó, vì vậy đồng hồ vệ tinh được hiệu chỉnh từ mặt đất nhiều lần mỗi ngày.

Máy bay có hai loại độ cao. Lời giải từ vệ tinh cho độ cao hình học so với ellipsoid tham chiếu. Nhưng độ cao nó phát đi cho mục đích không lưu là độ cao khí áp: áp suất không khí tại một lỗ đo trên 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 C ở mực nước biển, nhiệt độ giảm 6.5 độ mỗi kilômét. Khi áp suất thực khác tiêu chuẩn, độ cao khí áp của mọi máy bay đều sai cùng một lượng, và đó chính 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 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. Nếu có bảng tính, bạn hãy giải ngược công thức p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255 và kiểm tra rằng ở 11 000 m áp suất khoảng 227 hPa, chưa bằng một phần tư áp suất ở mực nước biển: không khí mà máy bay chở khách bay qua không đủ để bạn giữ được tỉnh táo.

Giờ hãy đảo ngược toàn bộ ý tưởng. Một số máy bay phát trên 1090 MHz mà không có vị trí: các bộ phát đáp cũ chỉ trả lời radar bằng mã nhận dạng và độ cao, hoặc máy bay bị gây nhiễu tín hiệu vệ tinh. Một mạng lưới máy thu vẫn có thể định vị chúng bằng phương pháp định vị đa điểm (multilateration). Giả sử bốn máy thu có đồng hồ đồng bộ cùng ghi lại thời điểm đến của một lần phát. 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 tất cả các điểm như vậy tạo thành một mặt hyperboloid nhận A và B làm tiêu điểm. Ba cặp độc lập từ bốn máy thu cho ba mặt hyperboloid, giao nhau tại máy bay. Đây là bài toán vệ tinh với cái đã biết và cái chưa biết đổi chỗ cho nhau: ở đó, một máy thu và bốn máy phát đã biết; ở đây, một máy phát và bốn máy thu đã biết. Trong cả hai trường hợp, đại lượng được đo là thời gian, và 1 micro giây là 300 m. Các máy thu đồng bộ đồng hồ đến khoảng 100 ns nhờ chính những vệ tinh mà máy bay sử dụng.

Bạn có thể làm điều này với âm thanh. Ba người cầm đồng hồ bấm giờ đứng ở các điểm đã đo đạc trên sân chơi; người thứ tư nấp đi và vỗ tay một lần; mỗi người ghi lại độ trễ. Với âm thanh truyền 343 m/s, chênh lệch 0.1 s là 34 m, và một bản vẽ theo tỉ lệ với các vị trí thử, hoặc phác họa các đường hyperbol, sẽ tìm ra

người vỗ tay. Sau đó hãy tự hỏi đồng hồ bấm giờ cần chính xác đến mức nào để làm điều tương tự với sóng radio trên 200 km, và bạn sẽ hiểu vì sao mạng lưới cần thời gian nguyên tử.

BÀI 3

Bản tin: 112 bit, và cách phát hiện lỗi

Bộ phát đáp gửi ADS-B dưới dạng squitter mở rộng Mode S: một phần mở đầu dài 8 micro giây, sau đó là 112 bit dữ liệu với tốc độ một bit mỗi micro giây. Phần mở đầu là một mẫu cố định gồm bốn xung tại 0, 1, 3.5 và 4.5 micro giây, và nhiệm vụ của nó là trả lời một câu hỏi có thể bạn chưa nghĩ tới: trong một kênh đầy nhiễu và đầy máy bay khác, làm sao máy thu biết một bản tin đã bắt đầu, và mỗi bit bắt đầu lúc nào? Bộ giải mã liên tục rình tìm mẫu đó, và khi thấy nó, bộ giải mã biết cả hai điều. Mọi giao thức số bạn dùng, từ Wi-Fi đến mã QR, đều có thứ tương tự.

Một máy phát chỉ có thể bật hoặc tắt; vậy làm sao nó 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: có xung ở nửa đầu và im lặng ở nửa sau là 1; im lặng rồi mới có xung là 0. Mỗi bit luôn có đúng một xung. Hãy nghĩ xem vì sao cách này tốt hơn "có xung là 1, không xung là 0". Máy thu không bao giờ mất nhịp, kể cả qua một chuỗi dài các số 0, mà với cách ngây thơ kia thì không thể phân biệt được với sự im lặng. Và nó quyết định mỗi bit bằng cách hỏi nửa nào mạnh hơn, chứ không phải xung có vượt qua một mức cố định nào đó hay không, nên một tín hiệu yếu từ 400 km được giải mã đáng tin cậy như một tín hiệu mạnh từ ngay trên đầu.

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.

Cách bố trí 112 bit như sau, và bạn nên thuộc lòng để tự viết lại được. Bit 1 đến 5: định dạng đường xuống (downlink format), bằng 17 với ADS-B từ bộ phát đáp. Bit 6 đến 8: mã năng lực (capability). Bit 9 đến 32: địa chỉ ICAO 24 bit, danh tính cố định của máy bay, được cấp khi đăng ký; có 2^24 = 16 777 216 địa chỉ, được phân cho các quốc gia theo từng khối, khối của Bỉ là từ 448000 đến 44FFFF trong hệ thập lục phân. Bit 33 đến 88: trường bản tin 56 bit, năm bit đầu của nó là mã loại (type code), cho biết 51 bit còn lại chứa gì. Mã loại 1 đến 4 mang hô hiệu dưới dạng tám ký tự 6 bit, mỗi ký tự có 64 ký hiệu. Mã loại 9 đến 18 mang vị trí trên không: 12 bit độ cao khí áp theo bước 25 feet, một cờ chẵn/lẻ, và mỗi thứ 17 bit cho vĩ độ và kinh độ đã mã hóa. Mã loại 19 mang vận tốc dưới dạng các thành phần tốc độ mặt đất theo hướng đông-tây và bắc-nam, tốc độ lên xuống, và hiệu số giữa độ cao khí áp và độ cao hình học. Bit 89 đến 112: 24 bit chẵn lẻ. Hãy kiểm tra phép tính: 12 bit độ cao với bước 25 ft phủ được 102 400 ft; 17 bit nếu dùng ngây thơ trên 180 độ vĩ độ chỉ phân giải được 1.4 km. Vị trí chính xác hơn thế nhờ báo cáo vị trí nén (compact position reporting): 17 bit cho vị trí bên trong một vùng chính xác đến vài mét, nhưng không cho biết đó là vùng nào, và máy bay luân phiên giữa hai lưới vùng, chẵn và lẻ. Một máy thu đã nghe được mỗi loại một bản tin sẽ xác định được vùng một cách rõ ràng, rồi sau đó theo dõi chỉ từ từng bản tin đơn lẻ. Chính xác hơn với cùng số bit, đổi lại bằng 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 mổ xẻ bản tin thật ở đầu trang này. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 gồm 28 chữ số thập lục phân, tức 112 bit. Hai chữ số đầu, 8D, là 1000 1101 trong hệ nhị phân; năm bit đầu, 10001, bằng 17, nên đây là ADS-B từ một bộ phát đáp, và ba bit tiếp theo, 101, cho năng lực 5. Sáu chữ số tiếp theo, 4840D6, là địa chỉ ICAO, mà bảng phân bổ xếp vào Hà Lan. Cặp 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 sẽ cho hô hiệu KLM1023. Sáu chữ số cuối, 576098, là phần chẵn lẻ. Với một bảng tính hoặc vài dòng mã, bạn có thể tự giải mã toàn bộ, và mục tiêu của bài học này là nhìn vào một dòng hex mà nói được "một máy bay của KLM đang thông báo chuyến bay 1023".

Phần chẵn lẻ đáng để suy nghĩ nhiều nhất. Trên một sân bay đông đúc, các lần phát từ nhiều máy bay khác nhau liên tục chồng lên nhau tại máy thu, và từng xung riêng lẻ bị mất vì nhiễu; bộ giải mã chắc chắn đôi khi sẽ ghép sai bit. 24 bit 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 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 nó đã giải mã. Chỉ cần một bit bị lật, hai bit, hay bất kỳ chuỗi lỗi liên tiếp nào dài tới 24 bit cũng làm thay đổi số dư, và bản tin bị loại bỏ. Hãy thử tự tay làm một CRC 4 bit trên một bản tin 8 bit để thấy cơ chế hoạt động, rồi nếu biết lập trình, hãy viết CRC-24 thật và kiểm tra rằng bản tin ví dụ vượt qua được, còn lật bất kỳ một bit nào cũng làm nó thất bại. Đây là cách phát hiện lỗi mà mọi hệ thống hiện đại đều dùng, trong một bối cảnh mà một lỗi bị bỏ sót có thể đưa một máy bay ma lên màn hình của kiểm soát viên.

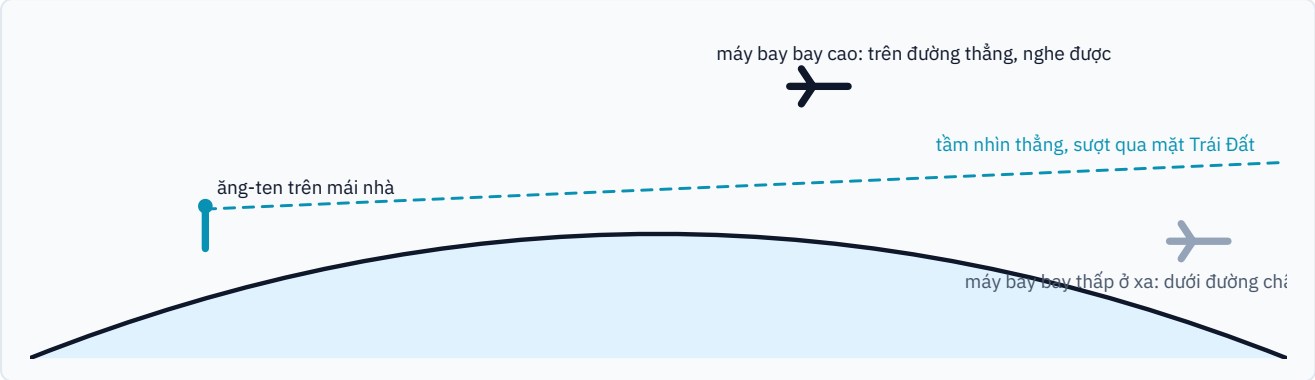
BÀI 4

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? Có hai giới hạn khác nhau, và nên tách riêng chúng ra. Giới hạn thứ nhất là hình học. Ở tần số 1090 MHz, sóng radio không uốn quanh Trái Đất; nó truyền theo đường thẳng, nên 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 bị mặt đất chắn. Hãy 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 và hai bán kính tạo thành một góc vuông tại tiếp điểm, nên d^2 + R^2 = (R + h)^2, suy ra d^2 = 2Rh + h^2, và vì h rất nhỏ so với R, d = sqrt(2Rh). Với R = 6 371 km và h tính bằng mét, d (km) = 3.57 sqrt(h). Khí quyển làm sóng radio hơi cong xuống vì chiết suất của nó giảm theo độ cao; cách hiệu chỉnh tiêu chuẩn là coi Trái Đất 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: 149 km. Máy bay trên đường băng cách 30 km: 4.12 x (4.47 + 2) = 27 km, nên không nghe được.



Hãy vẽ đồ thị d theo h2 với độ cao ăng-ten của chính bạn. Đường cong lúc đầu dốc rồi thoải dần, và nó giải thích hình dạng vùng phủ của mọi máy thu: 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 giải thích vì sao độ cao là tính chất quan trọng nhất của một máy thu, và vì sao một ngọn đồi, một tòa nhà, hay chính cánh của máy bay khi nó nghiêng rẽ đi có thể cắt đứt đường bay ngay lập tức.

Giới hạn thứ hai là năng lượng. Một bộ phát đáp bức xạ vài trăm oát, gần như đều theo mọi hướng nằm ngang. Ở khoảng cách d, công suất đó 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 bạn nên tự suy ra từ diện tích mặt cầu thay vì học thuộc. Xa gấp đôi, còn một phần tư công suất; xa gấp mười, còn một phần trăm. Kỹ sư biểu diễn suy hao bằng decibel, trong đó 10 dB là hệ số mười về công suất và 3 dB là hệ số hai, vì decibel biến phép nhân qua nhiều bậc độ lớn thành phép cộng. Suy hao đường truyền trong không gian tự do giữa hai ăng-ten đơn giản là:

$$\text{path loss (dB)} = 20 \log_{10}(d \text{ in km}) + 20 \log_{10}(f \text{ in MHz}) + 32.44$$

Ở 400 km và 1090 MHz: 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.

Con số đó đáng để dừng lại suy ngẫm: 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, chỉ bằng một phần triệu của một phần triệu oát. Một máy thu nghiệp dư tốt giải mã được đến khoảng -100 dBm, nên ở 400 km vẫn còn dư 9 dB. Nói cách khác, giới hạn năng lượng và đường chân trời hình học của một máy bay chở khách đang bay bằng rơi vào cùng một chỗ, và đó là chủ ý thiết kế: 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, để kênh không bị tràn ngập bởi máy bay từ nước bên cạnh.

Hai điều tinh chỉnh. Hiệu ứng Doppler: một máy bay tiến lại với tốc độ 250 m/s làm tần số thu được dịch đi f v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz, chưa tới một phần triệu, mà máy thu không bao giờ nhận ra; hãy so với âm thanh của chính máy bay đó, khi v / c là 250 / 343 và cao độ giảm gần một quãng tám khi nó bay qua. Và thời gian truyền: 400 km với tốc độ c mất 1.33 ms, nên vị trí phát đi đã cũ 1.33 ms khi đến nơi, 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, vốn sống nhờ chính những micro giây này.

BÀI 5

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, và cùng thiết bị đó, khi được cấp dòng điện, sẽ phát ra sóng; ăng-ten thu và ăng-ten phát là cùng một thứ chạy theo chiều ngược lại. Dòng điện cảm ứng lớn nhất khi cộng hưởng, tức là khi chiều dài vật dẫn cho phép phân bố dòng điện dọc theo nó khớp với dao động của sóng, giống như một sợi dây đàn có độ dài vừa đúng sẽ cộng hưởng với một nốt nhạc 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 đặt trên một mặt phẳng tiếp đất dẫn điện, mặt này phản chiếu nó để thanh và ảnh của nó cùng nhau tạo thành một 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. Một ăng-ten tự làm bị lệch cộng hưởng chỉ vì vài milimét sai số và chỉ nghe được một phần bầu trời, vì vậy máy thu của dự án dùng một ăng-ten đã được nhà sản xuất tinh chỉnh.

Một ăng-ten đơn cực thẳng đứng nhạy nhất về phía đường chân trời và hoàn toàn không nhạy dọc theo trục của chính nó; độ nhạy của nó trong không gian ba chiều có hình một chiếc bánh vòng (donut) với ăng-ten xuyên qua lỗ giữa. Vì thế máy thu của bạn sẽ nghe hoàn hảo những máy bay cách 300 km, nhưng mất vài giây một chiếc bay ngay trên đầu, và bạn có thể quan sát điều đó xảy ra. Một ăng-ten đồng tuyến (collinear), gồm nhiều phần tử cộng hưởng xếp chồng, làm chiếc bánh vòng dẹt hơn và tăng độ nhạy ở đường chân trời, đổi lại lỗ phía trên đầu lớn hơn: đó là độ lợi ăng-ten, đo bằng dBi, và nó đến từ việc phân bố lại độ nhạy, chứ không bao giờ tạo ra thêm độ nhạy. Và theo bài 1, ăng-ten phải đặt thẳng đứng, vì sóng phân cực thẳng đứng.

Giữa ăng-ten và một chấm trên bản đồ có bốn công đoạn. 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 mọi thứ phía sau. Bộ khuếch đại tạp âm thấp đặt tại ăng-ten nhân tín hiệu lên một nghìn lần trước khi vào cáp, vì ở 1090 MHz cáp mất khoảng 3 dB, tức một nửa tín hiệu, sau mỗi mười mét; nếu khuếch đại sau cáp, bạn khuếch đại luôn cả nhiễu của cáp. Radio định nghĩa bằng phần mềm (SDR), một thiết bị USB giá 20 euro vốn được bán làm bộ thu truyền hình, hạ tần tín hiệu và lấy mẫu nó hai triệu lần mỗi giây thành một dòng số. Từ đây trở đi là lập trình: phần mềm miễn phí quét các mẫu để tìm 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 danh tính theo địa chỉ ICAO, và giữ trạng thái của từng máy bay cho đến khi bản tin ngừng đến, thường là vì nó đã xuống dưới đường chân trời.

Hãy vẽ chuỗi đó, kèm đại lượng ở mỗi công đoạn: nano vôn tại ăng-ten, micro vôn sau bộ khuếch đại, hai triệu mẫu mỗi giây từ radio, vài trăm khung mỗi giây từ bộ giải mã, một bản ghi cho mỗi máy bay từ bộ theo dõi. Một chấm trên bản đồ là điểm cuối của một chuỗi mà mỗi mắt xích là một ý tưởng trong khóa học này: cộng hưởng, lọc, khuếch đại, lấy mẫu, so khớp mẫu, giải mã, kiểm tra lỗi, tổng hợp. Dự án là lắp ráp chuỗi đó và kiểm chứng khóa học với bầu trời: đo tầm thu tối đa theo độ cao và so sánh với công thức đường chân trời; so sánh ăng-ten đặt trong nhà, cạnh cửa sổ và trên mái, thẳng đứng và nằm ngang; ghi lại một ngày giao thông và tìm giờ đông đúc nhất cùng độ cao bay bằng điển hình; giải mã các bản tin thô và kiểm tra CRC bằng mã của chính bạn. Rồi hãy đặt ra những câu hỏi mà hệ thống gợi ra nhưng không trả

lời: các bản tin không được ký số, vậy điều gì ngăn ai đó phát đi một máy bay ma; máy bay phụ thuộc vào các vệ tinh có thể bị gây nhiễu, vậy kiểm soát viên thấy gì khi điều đó xảy ra; và dữ liệu nhận dạng được máy bay, mà máy bay có thể nhận dạng được con người, vậy ai nên được phép theo dõi ai.

Thử thách

Hãy tự giải từng bài trên giấy trước. Phần kiểm tra sẽ cho bạn đáp án và cách lập luận.

1. **1. Bước sóng của tín hiệu 1090 MHz là bao nhiêu, và một ăng-ten một phần tư bước sóng cho nó dài bao nhiêu?**

2. **2. Bản tin nhanh hơn âm thanh bao nhiêu lần? Một máy bay cách 30 km phát ra cả hai cùng lúc; khi âm thanh đến nơi, máy bay đã bay được bao xa?**

3. **3. Đồng hồ của một máy thu sai 2 micro giây. Điều đó gây ra sai số khoảng cách bao nhiêu, và vì sao máy thu vệ tinh cần bốn vệ tinh chứ không phải ba?**

4. **4. 24 bit địa chỉ có thể nhận dạng bao nhiêu máy bay? Một bản tin 112 bit với tốc độ 1 bit mỗi micro giây kéo dài bao lâu, và cả lần phát kèm phần mở đầu thì bao lâu?**

5. **5. Trong bản tin 8D4840D6..., định dạng đường xuống và năng lực là gì, và địa chỉ ICAO là gì?**

6. **6. Một ăng-ten thu đặt ở độ cao 15 m. Đường chân trời vô tuyến đến một máy bay ở 9 000 m là bao xa, và đến một máy bay ở 300 m là bao xa?**

7. **7. Vì sao tăng gấp đôi khoảng cách làm công suất thu được giảm còn một phần tư? Suy hao đường truyền ở 200 km là bao nhiêu, và so với 145 dB ở 400 km thì thế nào?**

8. **8. Hãy dự đoán tầm thu thay đổi thế nào nếu ăng-ten đặt nằm ngang, và nếu máy thu được chuyển từ mái nhà xuống tầng trệt.**

TIẾP THEO

Tự lắp ráp

Mọi điều trong các bài học này đều có thể kiểm chứng từ một ô cửa sổ. Buổi thực hành cho bạn danh sách mua sắm (khoảng 100 đến 150 euro, hoặc dùng một chiếc Raspberry Pi bạn đã có), loại ăng-ten nên chọn và nơi đặt nó, ba lệnh cài đặt phần mềm cấp dữ liệu Dataero, và các phép đo kiểm chứng công thức với máy bay thật: đường chân trời vô tuyến, định luật nghịch đảo bình phương, nhịp điệu trong ngày. Khi máy thu của bạn cấp dữ liệu cho bản đồ, mọi máy bay nó nghe được đều được vẽ lên cho tất cả mọi người, kèm tên trạm của bạn.

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

Đáp án

1. 1. Bước sóng của tín hiệu 1090 MHz là bao nhiêu, và một ăng-ten một phần tư bước sóng cho nó dài bao nhiêu?
   lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. Một phần tử một phần tư bước sóng dài 6.9 cm. Tốc độ ánh sáng cố định buộc tần số và bước sóng tỉ lệ nghịch với nhau.
2. 2. Bản tin nhanh hơn âm thanh bao nhiêu lần? Một máy bay cách 30 km phát ra cả hai cùng lúc; khi âm thanh đến nơi, máy bay đã bay được bao xa?
   3.00 x 10^8 / 343 = khoảng 875 000 lần. Bản tin đến sau 100 micro giây, âm thanh sau 87 s, trong thời gian đó máy bay bay với tốc độ 250 m/s đi được 22 km.
3. 3. Đồng hồ của một máy thu sai 2 micro giây. Điều đó gây ra sai số khoảng cách bao nhiêu, và vì sao máy thu vệ tinh cần bốn vệ tinh chứ không phải ba?
   2 x 10^-6 s x 3 x 10^8 m/s = 600 m. Ba vệ tinh chỉ xác định được x, y và z nếu đồng hồ hoàn hảo; độ lệch đồng hồ là ẩn số thứ tư, nên cần một vệ tinh thứ tư.
4. 4. 24 bit địa chỉ có thể nhận dạng bao nhiêu máy bay? Một bản tin 112 bit với tốc độ 1 bit mỗi micro giây kéo dài bao lâu, và cả lần phát kèm phần mở đầu thì bao lâu?
   2^24 = 16 777 216. Phần dữ liệu kéo dài 112 micro giây; cộng phần mở đầu 8 micro giây là 120 micro giây.
5. 5. Trong bản tin 8D4840D6..., định dạng đường xuống và năng lực là gì, và địa chỉ ICAO là gì?
   8D = 1000 1101. Năm bit đầu 10001 = 17: DF 17, ADS-B từ một bộ phát đáp Mode S. Ba bit tiếp theo 101 = 5: CA 5. Địa chỉ ICAO là 4840D6, được phân cho Hà Lan.
6. 6. Một ăng-ten thu đặt ở độ cao 15 m. Đường chân trời vô tuyến đến một máy bay ở 9 000 m là bao xa, và đến một máy bay ở 300 m là bao xa?
   d = 4.12 x (sqrt(15) + sqrt(9000)) = 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km. Với 300 m: 4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km.
7. 7. Vì sao tăng gấp đôi khoảng cách làm công suất thu được giảm còn một phần tư? Suy hao đường truyền ở 200 km là bao nhiêu, và so với 145 dB ở 400 km thì thế nào?
   Công suất phát trải ra trên một mặt cầu có diện tích 4 pi d^2, lớn gấp bốn lần khi khoảng cách tăng gấp đôi. Ở 200 km: 20 log10(200) + 20 log10(1090) + 32.44 = 46.0 + 60.7 + 32.4 = 139 dB, ít hơn 6 dB (hệ số bốn) so với ở 400 km.
8. 8. Hãy dự đoán tầm thu thay đổi thế nào nếu ăng-ten đặt nằm ngang, và nếu máy thu được chuyển từ mái nhà xuống tầng trệt.
   Nằm ngang: ăng-ten phân cực chéo so với sóng thẳng đứng; dòng điện cảm ứng phụ thuộc vào thành phần điện trường dọc theo vật dẫn, nên nó nghe được rất ít. Tầng trệt: số hạng đường chân trời 4.12 sqrt(h1) nhỏ đi và các tòa nhà chắn tầm nhìn thẳng, nên tầm thu giảm mạnh, nhất là với máy bay bay thấp.