

فك شفرة السماء

السطر الست عشري أدناه رسالة حقيقية، أرسلتها طائرة حقيقية نحو مرتين في الثانية. في 112 جزءًا من مليون من الثانية تعلن من هي الطائرة، وفي رسائلها المرافقة، أين هي، وما ارتفاعها، وما سرعتها. تعمل هذه الدورة على كل ما يلزم لفهمها: فيزياء الموجة التي تركبها، والتوقيت الذي يعطي الطائرة موقعها، والترميز الذي يضغطها في 112 بتًا، والهندسة التي تحدّد من مدى سماعها، والمستقبل الذي تستطيع بناءه لتسمعها بنفسك.

تعلّم - <https://radar.dataero.eu/ar/learning/ages-12-18/student> - 2026-10-22

المحتويات

الدرس 4 المدى: انحناء الأرض وقانون التربيع العكسي	ما هو ADS-B، في صفحة واحدة
الدرس 5 الهوائيات والمستقبلات: من موجة طولها 27 سنتيمترًا إلى نقطة على خريطة	الدرس 1 الموجة: الراديو بوصفه ضوءًا خفيًا
تحديات	الدرس 2 التوقيت والموقع: كيف تعرف الطائرة مكانها
التالي: ابنيه	الدرس 3 الرسالة: 112 بتًا، وكيف تُلتقط الأخطاء

ما هو ADS-B، في صفحة واحدة

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

سكويتر ممدّد واحد كما يسجله المستقبل: 28 رقمًا ست عشريًا، 112 بتًا. بحلول الدرس 3 ستستطيع قراءة كل حقل فيه.

على مراقبة الحركة الجوية أن تعرف مكان كل طائرة، باستمرار، لإبقائها متباعدة: تقطع طائرة الركاب في طيرانها الاعتيادي 250 m كل ثانية، وتتطلب قواعد الفصل 300 m رأسياً أو 9 km أفقيًا بين الطائرات الخاضعة لمراقبة الرادار. وعلى مدى سبعين عامًا كانت طريقة المعرفة هي الرادار: ترسل محطة أرضية نبضة وتقيس زمن الصدى، أو، في الصيغة الثانوية المحسّنة، تستجوب مرسلًا مستجيبًا على الطائرة يردّ على 1090 MHz بهوية وارتفاع. وللرادار حدود: يحتاج إلى قدرة هائلة، ولا يرى كل طائرة إلا مرة واحدة في كل دورة للهوائي، ولا يستطيع تغطية المحيطات أو الجبال.

يقلب ADS-B، المراقبة التابعة للتلقائية - البث (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast)، المشكلة. تحمل كل طائرة حديثة مستقبل ملاحية بالأقمار الاصطناعية فتعرف من ثمّ موقعها بدقة بضعة أمتار. ويجعل ADS-B ببساطة المرسل المستجيب في الطائرة يعلن ذلك الموقع، مع هويتها وارتفاعها وسرعتها، نحو مرتين في الثانية، على 1090 MHz، لا لأحد بعينه. تلقائي لأن لا شيء يُطلقه؛ وتابع لأن المعلومات تأتي كليًا من أجهزة الطائرة نفسها؛ ومراقبة لأن غرضه معرفة مكان الطائرات؛ وبث لأنه يُرسل من دون تشفير إلى كل من يستمع. ومنذ عام 2020 صار إلزاميًا لمعظم الطائرات في المجال الجوي الأوروبي والأمريكي. يستخدمه المراقبون إلى جانب الرادار، وتستخدمه الطائرات الأخرى لترى بعضها بعضًا، ويسمع مستقبل USB بسعر 25 يورو على سطح مدرسة الرسائل نفسها تمامًا.

لفهم النظام عليك فهم خمسة أشياء، وكل منها درس: الموجة الكهرومغناطيسية التي تحمل الرسالة؛ والتوقيت الذي يعطي الطائرة موقعها، والذي يتيح لشبكة العنور على طائرة لا تقول أين هي؛ والرسالة الرقمية وكيف تُلتقط الأخطاء فيها؛ والهندسة والطاقة اللتان تحدّدان من مدى سماعها؛ والهوائي والمستقبل اللذان يحوّلانها من جديد إلى بيانات. والسرّد الكامل في الدورة المرجعية؛ اقرأ فصلها

3 و5 قبل الدرس 3 وفصولها من 6 إلى 8 قبل الدرسين 4 و5.

الدرس 1

الموجة: الراديو بوصفه ضوءًا خفيًا

تغادر الرسالة الطائرة على شكل موجة كهرومغناطيسية: مجالات كهربائية ومغناطيسية متذبذبة تنتشر عبر الفضاء من دون وسط، بسرعة الضوء $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$. والضوء المرئي الظاهرة نفسها بتردد أعلى؛ تستجيب عينك لنحو $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ، بينما يُرسل ADS-B على $1.09 \times 10^9 \text{ Hz}$ ، أي أدنى بنصف مليون مرة. لا فرق في النوع بين رسالة الطائرة والضوء الصادر من هذه الشاشة، بل في التردد فقط.

ولأن الموجة تسير بسرعة ثابتة، فإن ترددها يحدّد طولها الموجي. في ثانية واحدة تتقدّم الموجة c مترًا وتُتمّ f دورة، فتشغل كل دورة c / f مترًا: $c = f \times \lambda$. وبالنسبة إلى $\lambda = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275 \text{ m}$. فالموجة المارة بين الطائرة وهوائيك قممها متباعدة 27.5 cm ، بين إشارة الهاتف المحمول (17 cm) ومحطة إذاعة FM (3 m) على الطيف. ارسم ذلك الطيف بنفسك، على محور لوغاريتمي من 10^6 Hz إلى 10^{18} Hz ، وضع عليه إذاعة FM وADS-B والهوائيات المحمولة Wi-Fi والأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي والأشعة السينية. تقع موجة الطائرة بين الأشياء التي في جيبك.

$$c = f \times \lambda$$

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

وما ليست الموجة الراديوية إياه هو الصوت. فالصوت موجة ضغط في وسط، تسير بسرعة 343 m/s في الهواء، و $1,500 \text{ m/s}$ في الماء، ولا تسير على الإطلاق في الفراغ. والراديو ضوء: لا يحتاج إلى وسط، وهكذا يعبر الفراغ من قمر اصطناعي إلى الطائرة، وهو أسرع بعامل $3.00 \times 10^8 / 343$ ، أي نحو $875,000$. وإذا أصدرت طائرة على بعد 30 km صوتًا ورسالة في اللحظة نفسها، وصلت الرسالة في 100 ميكروثانية؛ ووصل الصوت بعد 87 ثانية، تكون الطائرة عندها قد طارت 22 km . وتشترك موجة الحبل مع الضوء في الخصائص التي تهّم، طول موجي وتردد وسرعة ثابتة، بحيث يعني الهزّ الأسرع موجات أقصر لا أسرع؛ وتختلف في حاجتها إلى الحبل.

خاصية واحدة للموجة ستهمّ في الدرس 5: استقطابها. يتذبذب المجال الكهربائي في اتجاه محدّد عمودي على اتجاه الانتقال. وهوائيات الطائرات رأسية، فموجة ADS-B مستقطبة رأسيًا، وهوائي الاستقبال الموضوع على جانبه لا يكاد يعترض شيئًا منها، كما تُوقّف موجة حبل تُهزّ رأسيًا بشقّ أفقي. تنبأ الآن بما سيحدث لمدى مستقبلك إذا كان الهوائي أفقيًا؛ ستختبر ذلك في المشروع.

الدرس 2

التوقيت والموقع: كيف تعرف الطائرة مكانها

يأتي الموقع في كل رسالة ADS-B من الملاحة بالأقمار الاصطناعية، والملاحة بالأقمار الاصطناعية قياس للزمن. يدور نحو ثلاثين قمرًا اصطناعيًا لكل نظام (GPS وGalileo وGLONASS وBeiDou) على ارتفاع نحو $20,200 \text{ km}$ ، لكل منها ساعة ذرية، ويبثّ كل منها إشارة تذكر موقعه ولحظة الإرسال بالضبط. ويسجّل المستقبل على الطائرة لحظة الوصول. والفرق، مضرّوًا في c ، هو المسافة إلى ذلك القمر؛ ومن فوق الرأس مباشرة تستغرق الإشارة $0.0673 \text{ s} = 300,000 / 20,200$. مسافة واحدة تضع المستقبل على كرة حول ذلك القمر؛ وكرتان تلتقيان في دائرة؛ وثلاث تلتقي في نقطتين، إحداهما بعيدة عن الأرض فتُستبعد. وكانت ثلاثة أقمار لتكفي لو كان للمستقبل ساعة مثالية. لكن له بلّورة كوارتز تنحرف بميكروثوانٍ، والميكروثانية الواحدة 300 m من المدى. فيعامل المستقبل خطأ ساعته مجهولًا رابعًا ويستخدم قمرًا رابعًا: أربع معادلات، أربعة مجاهيل (x و y و z وإزاحة الساعة)، تُحلّ باستمرار. ونتيجةً جانبية، يحافظ كل مستقبل أقمار اصطناعية على الوقت ضمن عشرات النانوثواني، وهو ما يعتمد عليه النصف الثاني من هذا الدرس.

تمسك بالمقادير: يقطع الضوء 0.3 m في النانوثانية و300 m في الميكروثانية. وموقع بدقة 3 m يعني توقيتاً بدقة 10 ns. وقمر اصطناعي تتقدم ساعته بميكروثانية واحدة سيدفع كل مستقبل يستخدمه 300 m على امتداد الخط نحوه، ولهذا تُصحح ساعات الأقمار من الأرض عدة مرات في اليوم.

تحمل الطائرة ارتفاعين. يعطي حل الأقمار الاصطناعية ارتفاعاً هندسياً فوق الإهليلج المرجعي. لكن الارتفاع الذي تبته لأغراض الحركة الجوية بارومتري: ضغط الهواء عند فتحة في جسم الطائرة، محوّلًا إلى ارتفاع عبر الغلاف الجوي القياسي الدولي، الذي يفترض 1013.25 hPa و15 درجة مئوية عند مستوى سطح البحر وانخفاضاً قدره 6.5 درجة لكل كيلومتر. وعندما يختلف الضغط الحقيقي عن القياسي، يكون الارتفاع البارومتري لكل طائرة خاطئاً بالمقدار نفسه، وهذا بالضبط ما يحتاج إليه الفصل بين الطائرات: طائرتان تقرأن مستويي الطيران 350 و360 تبعدان 1,000 ft أيًا كان الطقس. تحمل رسالة الموقع الارتفاع البارومتري بخطوات من 25 قدمًا؛ وتحمل رسالة السرعة الفرق بين الارتفاع البارومتري والهندسي. إن كان لديك جدول بيانات، اعكس / 0.0065 h - 1 p = p0 (288.15)^5.255 وتحقق من أن الضغط عند 11,000 m نحو 227 hPa، أقل من ربع ضغط مستوى سطح البحر: الهواء الذي تطير فيه طائرة الركاب لن يبقيك واعيًا.

اقلب الآن الفكرة كلها. ترسل بعض الطائرات على 1090 MHz من دون موقع: مرسلات مستجيبة قديمة تردّ على الرادار بالهوية والارتفاع فقط، أو طائرات يُشوّش على استقبالها للأقمار الاصطناعية. وتستطيع شبكة من المستقبلات تحديد موقعها مع ذلك بالتحديد متعدّد المواقع (multilateration). افترض أن أربعة مستقبلات ذات ساعات متزامنة يسجل كل منها زمن وصول الإرسال نفسه. الرسالة التي وصلت إلى المستقبل A قبل المستقبل B بميكروثانية واحدة أرسلت من نقطة أقرب إلى A منها إلى B بمقدار 300 m، وكل تلك النقاط تشكّل سطحًا زائديًا بؤرتاه A وB. وثلاثة أزواج مستقلة من أربعة مستقبلات تعطي ثلاثة سطوح زائدية، تتقاطع عند الطائرة. إنها مسألة الأقمار الاصطناعية بتبادل المعلوم والمجهول: هناك، مستقبل واحد وأربعة مرسلات معلومة؛ وهنا، مرسل واحد وأربعة مستقبلات معلومة. وفي كليهما، ما يُقاس هو الزمن، والميكروثانية الواحدة 300 m. وتزامن المستقبلات ساعاتها ضمن نحو 100 ns من الأقمار الاصطناعية نفسها التي تستخدمها الطائرة.

تستطيع فعل ذلك بالصوت. ثلاثة أشخاص بساعات إيقاف عند نقاط مساحية معلومة في ملعب؛ ورابع، مختبئ، يصقّ مرة واحدة؛ ويسجل كل منهم التأخر. وبالصوت بسرعة 343 m/s، فرق 0.1 s هو 34 m، ورسم بمقياس مع مواقع تجريبية، أو تخطيط للقطوع الزائدة، يعثر على المصقّق. ثم اسأل ما الدقة التي ستحتاج إليها ساعات إيقاف لفعل الشيء نفسه بالراديو على مدى 200 km، وستفهم لماذا تحتاج الشبكة إلى الزمن الذري.

الدرس 3

الرسالة: 112 بتًا، وكيف تلتقط الأخطاء

يرسل المرسل المستجيب ADS-B على شكل سكويتير ممدّد في Mode S: مقدّمة من 8 ميكروثوانٍ، ثم 112 بتًا من البيانات بمعدل بت واحد في الميكروثانية. والمقدّمة نمط ثابت من أربع نبضات عند 0 و1 و3.5 و4.5 ميكروثانية، ومهمتها الإجابة عن سؤال ربما لم تفكر في طرحه: في قناة مليئة بالضوضاء وبطائرات أخرى، كيف يعرف المستقبل أن رسالة بدأت، ومتى يبدأ كل بت؟ يراقب المفكّك باستمرار بحثًا عن ذلك النمط، وعندما يراه، يعرف الاثنين. ولكل بروتوكول رقمي تستخدمه، من Wi-Fi إلى رمز QR، ما يعادلها.

يمكن للمرسل أن يكون مشغلاً أو مطفأً؛ فكيف يرسل 1 أو 0؟ يستخدم ADS-B تضمين موضع النبضة. تُقسم كل فتحة بت مدّتها ميكروثانية واحدة إلى نصفين: نبضة في النصف الأول وصمت في الثاني هي 1؛ وصمت ثم نبضة هي 0. هناك دائماً نبضة واحدة بالضبط لكل بت. فكّر لماذا هذا أفضل من «نبضة تعني 1، لا نبضة تعني 0». لا يفقد المستقبل توقيته أبداً، حتى عبر سلسلة طويلة من الأصفار، التي كانت في المخطط الساذج لا تُميّز عن الصمت. ويقرّر كل بت بسؤال أي النصفين كان أعلى بدلاً من ما إذا كانت نبضة قد تجاوزت مستوى ثابتاً ما، فتُفكّ إشارة ضعيفة من 400 km بالموثوقية نفسها التي تُفكّ بها إشارة قوية من فوق الرأس.

أربعة بتات في تضمين موضع النبضة: 1، 0، 1، 1



كل فتحة مدتها 1 ميكروثانية. نبضة في النصف الأول: 1. نبضة في النصف الثاني: 0.

تُرتَّب البتات الـ 112 كما يلي، وينبغي أن تستطيع استرجاع هذا من الذاكرة. البتات من 1 إلى 5: صيغة الوصلة الهابطة، ADS-B J 17 من مرسل مستجيب. البتات من 6 إلى 8: رمز القدرة. البتات من 9 إلى 32: عنوان الإيكافو المكوّن من 24 بتًا، هوية الطائرة الدائمة، تُعَيَّن عند التسجيل؛ يوجد $24^2 = 16,777,216$ منها، مخصّصة للدول على شكل كتل، وكتلة بلجيكا من 448000 إلى 44FFFF بالنظام الست عشري. البتات من 33 إلى 88: حقل الرسالة المكوّن من 56 بتًا، وبتاته الخمسة الأولى، رمز النوع، تقول ما تحتويه الـ 51 الأخرى. رموز النوع من 1 إلى 4 تحمل رمز النداء كثمانية محارف من 6 بتات، 64 رمزًا لكل منها. ورموز النوع من 9 إلى 18 تحمل موقعًا جويًا: 12 بتًا من الارتفاع البارومتري بخطوات من 25 قدمًا، ورأية زوجي/فردية، و17 بتًا لكل من خط العرض وخط الطول المرمّزين. ورمز النوع 19 يحمل السرعة كمركّبي سرعة أرضية شرق-غرب وشمال-جنوب، والمعدل الرأسي، والفرق بين الارتفاع البارومتري والهندسي. البتات من 89 إلى 112: التكافؤ المكوّن من 24 بتًا. تحقّق من الحساب: 12 بتًا من الارتفاع بخطوات 25 ft تغطّي 102,400 ft؛ و17 بتًا مستخدمة بسدّاجة على 180 درجة من خط العرض لن تميّز إلا 1.4 km. والموقع أفضل من ذلك بفضل الإبلاغ المضغوط عن الموقع: تعطي البتات الـ 17 الموقع داخل منطقة إلى بضعة أمتار، لا أي منطقة، وتتناوب الطائرة بين شبكي مناطق، زوجية وفردية. والمستقبل الذي سمع واحدة من كل نوع يحدّد المنطقة من دون لبس ثم يتتبع من رسائل مفردة. دقة أكبر من البتات نفسها، مشتراة بالزمن.

DF	CA	عنوان الإيكافو	الحمولة - ME	PI
بت 5 صيغة الوصلة الهابطة	بت 3 القدرة	بت 24 هوية الطائرة الفريدة	بت 56 الموقع أو الارتفاع أو السرعة أو رمز النداء أو الحالة، بحسب رمز النوع في بتاته الخمسة الأولى	بت 24 (CRC) فحص الأخطاء

شرح الرسالة الحقيقية من أعلى هذه الصفحة. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 هي 28 رقمًا ست عشريًا، 112 بتًا. الرقمان الأولان، 8D، هما 10001101 بالثنائي؛ والبتات الخمسة الأولى، 10001، تساوي 17، فهذه رسالة ADS-B من مرسل مستجيب، والثلاثة التالية، 101، تعطي القدرة 5. والأرقام الستة التالية، 4840D6، هي عنوان الإيكافو، الذي تضعه جداول التوزيع في هولندا. وزوج الأرقام التالي، 20، يبدأ بـ 00100، رمز النوع 4، رسالة تعريف، وفكّ ترميز المحارف ذات الـ 6 بتات التالية يعطي رمز النداء KLM1023. والأرقام الستة الأخيرة، 576098، هي التكافؤ. بجدول بيانات أو بضعة أسطر من الشفرة تستطيع إجراء فكّ الترميز كله، والقدرة على النظر إلى سطر ست عشري والقول «طائرة KLM تعلن الرحلة 1023» هي هدف هذا الدرس.

يستحق التكافؤ أكبر قدر من التفكير. فوق مطار مزدحم، تتداخل إرسالات من طائرات مختلفة عند المستقبل باستمرار، وتضيع نبضات مفردة بسبب الضوضاء؛ ولا بد أن يجتّع المفكّك بتات خاطئة أحيانًا. والبتات الـ 24 الأخيرة فحص تكرار دوري: تُعامل بتات الرسالة الـ 88 كعدد ثنائي طويل واحد ويُقسم، في حساب يكون فيه الطرح هو «أو الحصري» (XOR)، على كثيرة حدود مولّدة ثابتة من 25 بتًا؛ والباقي هو CRC. يعيد المستقبل القسمة على البتات التي فكّ ترميزها. وأي بت واحد مقلوب، وأي بتين، وأي دفقة أخطاء بطول يصل إلى 24 بتًا تغيّر الباقي، فتُرفض الرسالة. جرّب فحص CRC من 4 بتات على رسالة من 8 بتات يدويًا لترى الآلية، ثم، إن كنت ترمج، نفّذ CRC-24 الحقيقي وتحقّق من أن الرسالة المثال تنجح وأن قلب أي بت واحد يُخفقها. هذا هو كشف الأخطاء كما يفعله كل نظام حديث، في سياق قد يضع فيه خطأ فائت طائرة شبكًا على شاشة مراقب.

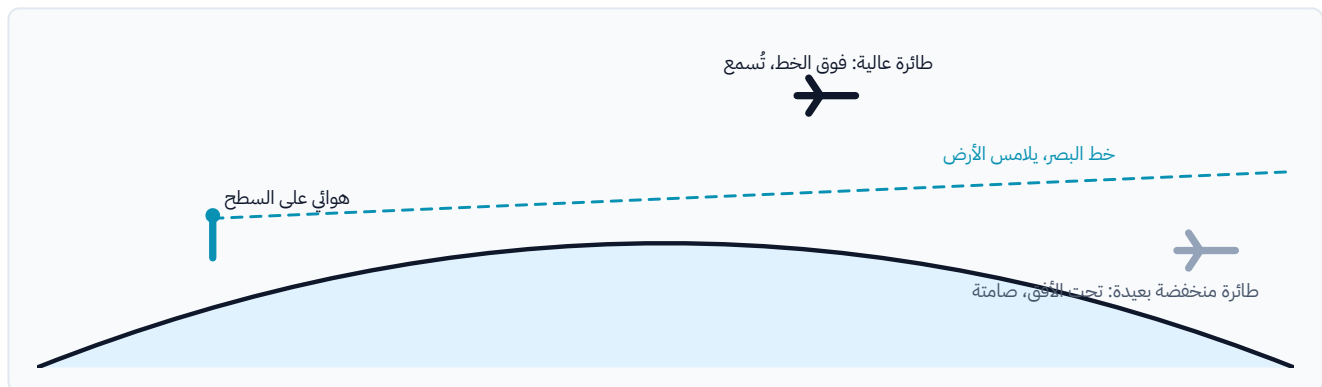
الدرس 4

المدى: انحناء الأرض وقانون التربيع العكسي

من أي بعد يستطيع مستقبل سماع طائرة؟ ينطبق حدان مختلفان، ويجدر إبقاؤهما منفصلين. الأول هندسي. عند 1090 MHz لا ينحني الراديو حول الأرض؛ يسير في خطوط مستقيمة، فلا يسمع المستقبل إلا الطائرات فوق أفقه، تلك التي يتجاوز الخط المستقيم منها إلى الهوائي سطح الأرض. اشتق مسافة الأفق. هوائي على ارتفاع h فوق كرة نصف قطرها R يرى أفقاً حيث يكون خط بصره مماساً للكرة؛ ويشكل المماس ونصف القطر زاوية قائمة عند نقطة التماس، ف $d^2 + R^2 = (R + h)^2$ ، ما يعطي $d^2 = 2Rh$ ، ولأن h مهملة أمام R ، فإن $d = \sqrt{2Rh}$ ، و $R = 6,371 \text{ km}$ و h بالمتر، $d \text{ (km)} = 3.57 \sqrt{h}$. ويحني الغلاف الجوي الراديو قليلاً نحو الأسفل لأن معامل انكساره ينخفض مع الارتفاع؛ ويعامل التصحيح القياسي الأرض كما لو كان نصف قطرها أربعة أثلاث قيمته الحقيقية، فيستبدل بـ 3.57 القيمة 4.12. وخط البصر الكامل من هوائي على ارتفاع h_1 إلى طائرة على ارتفاع h_2 هو مجموع مسافتي الأفق:

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad \text{حيث } h_1 \text{ و } h_2 \text{ متر}$$

الهوائي نفسه، وطائرة على ارتفاع 1,000 m: $4.12 \times (4.47 + 104.9) = 451 \text{ km}$. وطائرة على ارتفاع 11,000 m، هوائي على سطح بارتفاع 20 m: $4.12 \times (4.47 + 2) = 27 \text{ km}$. وفي صامتة، 30 km: $4.12 \times (4.47 + 2) = 27 \text{ km}$. وخط الطائرة على مدرج على بعد 149 km.



ارسم d بدلالة h_2 لارتفاع هوائيك. المنحنى حاد في البداية ثم يتسطح، وهو يفسر شكل تغطية كل مستقبل: 400 km وأكثر للحركة في الطيران الاعتيادي، وبضع عشرات من الكيلومترات للطائرات في مرحلة الاقتراب، ولا شيء على الأرض إلا في المطار المجاور. ويفسر لماذا الارتفاع أهم خاصية للمستقبل، ولماذا يستطيع تل، أو مبنى، أو جناح الطائرة نفسها وهي تميل بعيداً، أن يقطع المسار في الحال.

الحد الثاني هو الطاقة. يُشع المرسل المستجيب بضع مئات من الواط، بتوزيع متجانس تقريباً في كل الاتجاهات الأفقية. وعند المسافة d تكون تلك القدرة منتشرة على كرة مساحتها $4\pi d^2$ ، فتتخفض القدرة التي يعترضها هوائي ذو مساحة فعالة ثابتة بنسبة $1/d^2$: قانون التربيع العكسي، الذي ينبغي أن تشتق من مساحة الكرة لا أن تحفظه. ضعف المسافة، ربع القدرة؛ عشرة أضعاف، جزء من مئة. ويعتبر المهندسون عن الفقد بالديسيبل، حيث 10 dB عامل عشرة في القدرة و 3 dB عامل اثنين، لأن الديسيبل يحوّل الضرب عبر مراتب كثيرة من المقادير إلى جمع. وفقد المسار في الفضاء الحر بين هوائين بسيطين هو:

$$+ 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) - 32.44 \quad \text{(بالكيلومترات } d \text{)} \quad \text{فقد المسار (dB)}$$

؛ والقدرة المستقبلية -91 dBm هو $+54 \text{ W}$ مرسل بقدرة 250 dB. $52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 \text{ dB}$. و 1090 MHz عند 400 km: 10^{-13} W نحو 8 dBm.

ذلك الرقم يستحق التوقُّف عنده: مستقبل على سطح يكتشف إشارة أضعف بـ $10^{14.5}$ مرة من تلك التي غادرت الطائرة، جزء من مليون من المليون من الواط. ويفكَّ مستقبل هواة جيد الترميز حتى نحو -100 dBm، فهناك 9 dB من الاحتياطي عند 400 km. بعبارة أخرى، يقع الحدُّ الطاقوي والأفق الهندسي لطائرة ركاب في طيرانها الاعتيادي في المكان نفسه، وهذا مقصود: حُدِّدت قدرة المرسل المستجيب ومعايير المستقبلات بحيث تكون الطائرة مسموعة حتى أفقها وليس أبعد بكثير، وهذا يمنع إغراق القناة بحركة من البلد المجاور.

تهذيبان. دوبرلر: طائرة تقترب بسرعة 250 m/s تزيح التردد المستقبل بمقدار $f_{v/c} = 1.09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Hz، أقل من جزء في المليون، وهو ما لا يلاحظه المستقبل أبدًا؛ قارن بصوت الطائرة نفسها، حيث v/c تساوي 343 / 250 وتنخفض طبقة الصوت بمعظم أوكثاف وهي تمرّ. وزمن الانتقال: 400 km بسرعة c هي 1.33 ms، فالموقع المبعوث عمره أصلاً 1.33 ms عند الوصول، تحرّكت خلالها الطائرة 33 cm؛ مهمل للخريطة، حاسم للتحديد متعدّد المواقع، الذي يعيش على هذه الميكروثواني بالذات.

الدرس 5

الهوائيات والمستقبلات: من موجة طولها 27 سنتيمترًا إلى نقطة على خريطة

الهوائي موصل تحت فيه الموجة الكهرومغناطيسية المازّة تيارًا متناوئًا، والجهاز نفسه، إذا غُذّي بتيار، يُطلق موجة؛ فهوائيا الاستقبال والإرسال الشيء نفسه يعمل بالعكس. ويكون التيار المحثوث أكبر ما يكون عند الرنين، عندما يتيح طول الموصل لتوزيع التيار على امتداده أن يتطابق مع تذبذب الموجة، كما يرنّ وتر بالطول المناسب مع نغمة معيّنة. والرنين الأساسي لموصل مستقيم عند نصف طول موجي، 13.75 cm عند 1090 MHz، مع تيار أعظمي في المركز وصفري عند الطرفين. وهوائي ADS-B العملي، على الطائرات وعلى معظم المستقبلات، هوائي أحادي القطب ربع موجي: عنصر رأسي طوله 6.9 cm على مستوى أرضي موصل، يعكسه بحيث يشكّل العنصر وصورته معًا ثنائي القطب نصف الموجي. وعلى الطائرة يكون جسمها هو المستوى الأرضي؛ أما الهوائي 1090 MHz المشتري فيخفي الهندسة نفسها داخل أنبوبه، مكرّرة عدة مرات فوق بعضها. الهوائي المصنوع في البيت يفقد ضبطه بخطأ بضعة مليمترات ولا يسمع إلا جزءًا يسيرًا من السماء، ولهذا يستخدم مستقبل المشروع هوائيًا مضبوطًا في المصنع.

الهوائي أحادي القطب الرأسي أكثر حساسية نحو الأفق وعديم الحساسية على امتداد محوره؛ وحساسيته في الأبعاد الثلاثة كعكة حلقة والهوائي يمرّ عبر ثقبها. فسيسمع مستقبلك طائرات على بعد 300 km بشكل تام ويفقد طائرة تمرّ فوقه مباشرة لبضع ثوانٍ، وتستطيع مشاهدة ذلك يحدث. والهوائي الخطّي المتراصّ، عدة عناصر رنانة مرصوفة، يسطّح الكعكة ويزيد الحساسية عند الأفق على حساب الثقب فوق الرأس: هذا هو كسب الهوائي، مقيسًا بـ dBi، وهو يأتي من إعادة توزيع الحساسية، لا من خلقها أبدًا. ومن الدرس 1، يجب أن يكون الهوائي رأسيًا، لأن الموجة مستقطبة رأسيًا.

بين الهوائي والنقطة على الخريطة أربع مراحل. مرشّح تمرير نطاق يمرّر 1090 MHz ويرفض إشارات الهاتف المحمول الأقوى بكثير على بعد بضع مئات من الميغاهرتز التي كانت ستشبع كل ما بعده لولاه. ومضخّم منخفض الضوضاء عند الهوائي يضاعف الإشارة ألف مرة قبل الكابل، الذي يفقد عند 1090 MHz نحو 3 dB، أي نصف الإشارة، كل عشرة أمتار؛ ضخّم بعد الكابل فتضخّم ضوضاء الكابل أيضًا. وراديو معرّف بالبرمجيات، جهاز USB بسعر 20 يورو بيع أصلًا موالف تلفاز، يخلط الإشارة نزولًا ويعاينها مليوني مرة في الثانية إلى سيل من الأرقام. ومن هنا فصاعدًا الأمر برمجة: تسمح برمجيات مجانية العتّات بحثًا عن المقدّمة، وتقيس أي نصفي كل فتحة ميكروثانية يحمل طاقة أكبر، وتجنّع 112 بتًا، وتحسب CRC، وإن نجح، تفكّ ترميز الحقول. ثم يقرن متعقّب إشارات الموقع الزوجية والفردية، ويدمج الموقع والسرعة والهوية بعنوان الإيكاو، ويحتفظ بحالة كل طائرة حتى تتوقّف الرسائل عن الوصول، عادة لأنها هبطت تحت الأفق.

ارسم تلك السلسلة، مع الكمية عند كل مرحلة: نانوفولتات عند الهوائي، وميكروفولتات بعد المضخّم، ومليون عيّنة في الثانية من الراديو، وبضع مئات من الإطارات في الثانية من المفكّك، وسجل واحد لكل طائرة من المتعقّب. والنقطة على الخريطة هي الطرف البعيد لسلسلة كل حلقة فيها فكرة من هذه الدورة: الرنين، والترشيح، والتضخيم، والمعاينة، ومطابقة الأنماط، وفكّ الترميز، وفحص

الأخطاء، والتجميع. والمشروع هو بناء السلسلة واختبار الدورة في مواجهة السماء: قس مداك الأقصى بدلالة الارتفاع وقارنه بمعادلة الأفق؛ وقارن الهوائي في الداخل، وعند نافذة، وعلى السطح، رأسياً وأفقيًا؛ وسجّل يومًا من الحركة واعثر على الساعة الأكثر ازدحامًا وارتفاع الطيران الاعتيادي النموذجي؛ وفكّ ترميز رسائل خام وتحقق من CRC فيها بشفرتك الخاصة. ثم اطرح الأسئلة التي يطرحها النظام ولا يجيب عنها: الرسائل غير موقعة، فما الذي يمنع أحدًا من بثّ طائرة شبح؛ والطائرة تعتمد على أقمار اصطناعية يمكن التشويش عليها، فماذا يرى المراقب عندما يُشوَّش عليها؛ والبيانات تحدّد هوية الطائرات، وهذا يمكن أن يحدّد هوية أشخاص، فمن ينبغي أن يستطيع تتبّع من.

تحديات

احسب كلًّا منها على الورق أولاً. يعرض زر التحقق الإجابة والتعليق.

1.1. ما الطول الموجي لإشارة 1090 MHz، وكم طول هوائي ربع موجي لها؟

2.2. كم مرة الرسالة أسرع من الصوت؟ طائرة على بعد 30 km تصدر الاثنین معًا؛ كم طارت عندما يصل الصوت؟

3.3. ساعة مستقبل خاطئة بميكروثانييتين. ما خطأ المدى الذي يسببه ذلك، ولماذا يحتاج مستقبل الأقمار الاصطناعية إلى أربعة أقمار لا ثلاثة؟

4.4. كم طائرة يستطيع عنوان من 24 بتًا تحديدها؟ كم تدوم رسالة من 112 بتًا بمعدل بت واحد في الميكروثانية، وكم يدوم الإرسال كله مع مقدّمته؟

5.5. في الرسالة 8D4840D6...، ما صيغة الوصلة الهابطة والقدرة، وما عنوان الإيكاو؟

6.6. هوائي استقبال على ارتفاع 15 m. ما الأفق الراديوي إلى طائرة على ارتفاع 9,000 m، وإلى طائرة على ارتفاع 300 m؟

7.7. لماذا تقسم مضاعفة المسافة القدرة المستقبلية على أربعة؟ ما فقد المسار عند 200 km، وكيف يقارن بـ 145 dB عند 400 km؟

8.8. تنبأ بما يحدث للمدى إذا وُضع الهوائي أفقيًا، وإذا نُقل المستقبل من السطح إلى الطابق الأرضي.

التالي

ابنه

كل ما في هذه الدروس يمكن التحقق منه من نافذة. تعطيك الورشة العملية قائمة المشتريات (نحو 100 إلى 150 يورو، أو Raspberry Pi تملكه أصلًا)، والهوائي الذي تختاره وأين تضعه، والأوامر الثلاثة التي تثبت مغدّي Dataero، والقياسات التي تختبر المعادلات على طائرات حقيقية: الأفق الراديوي، وقانون التربيع العكسي، والإيقاع اليومي. وعندما يغدّي مستقبلك الخريطة، تُرسم كل طائرة يسميها للجميع، وعليها اسم محطتك.

<https://radar.dataero.eu/ar/learning/workshop> افتح الورشة العملية

الإجابات

1. 1. ما الطول الموجي لإشارة 1090 MHz، وكم طول هوائي ربع موجي لها؟
 $\lambda = c / f = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275 \text{ m}$
 يكون التردد والطول الموجي في علاقة عكسية.
2. 2. كم مرة الرسالة أسرع من الصوت؟ طائرة على بعد 30 km تصدر الاثنين معًا؛ كم طارت عندما يصل الصوت؟
 $x = 343 \times 10^8 / 875,000 = 392 \text{ m/s}$
 مسافة 22 km.
3. 3. ساعة مستقبل خاطئة بميكروثانيتين. ما خطأ المدى الذي يسببه ذلك، ولماذا يحتاج مستقبل الأقمار الاصطناعية إلى أربعة أقمار لا ثلاثة؟
 $600 \text{ m} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \times 3 \times 10^{-6} \text{ s}$
 قمر رابع.
4. 4. كم طائرة يستطيع عنوان من 24 بتًا تحديدها؟ كم تدوم رسالة من 112 بتًا بمعدل بت واحد في الميكروثانية، وكم يدوم الإرسال كله مع مقدمته؟
 $2^{112} = 16,777,216$ تدوم البيانات 112 ميكروثانية؛ ومع المقدمة ذات الـ 8 ميكروثوان، 120 ميكروثانية.
5. 5. في الرسالة 8D4840D6...، ما صيغة الوصلة الهابطة والقدرة، وما عنوان الإيكاو؟
 $8D = 10001101$ البتات الخمسة الأولى $17:17 = 10001$ رسالة ADS-B من مرسل مستجيب Mode S. والبتات الثلاثة التالية $101 = 5:5$ CA. وعنوان الإيكاو هو 4840D6، مخصص لهولندا.
6. 6. هوائي استقبال على ارتفاع 15 m. ما الأفق الراديوي إلى طائرة على ارتفاع 9,000 m، وإلى طائرة على ارتفاع 300 m؟
 $d = 4.12 \times (\sqrt{15} + \sqrt{9000}) = 4.12 \times (3.87 + 94.9) = 407 \text{ km}$
 $d = 4.12 \times (\sqrt{300} + \sqrt{9000}) = 87 \text{ km}$
7. 7. لماذا تقسم مضاعفة المسافة القدرة المستقبلة على أربعة؟ ما فقد المسار عند 200 km، وكيف يقارن بـ 145 dB عند 400 km؟
 $139 \text{ dB} = 32.4 + 60.7 + 46.0 = \log_{10}(1090) + 32.44$ أقل بـ 6 dB (عامل أربعة) مما عند 400 km.
 $20 \log_{10}(200) + 20 = 20 \log_{10}(400)$ عند ضعف المسافة.
8. 8. تنبأ بما يحدث للمدى إذا وُضع الهوائي أفقيًا، وإذا نُقل المستقبل من السطح إلى الطابق الأرضي.
 أفقيًا: الهوائي متعامد الاستقطاب مع الموجة الرأسية؛ والتيار المحثوث يعتمد على مركبة المجال على امتداد الموصل، فلا يسمع إلا القليل جدًا. الطابق الأرضي: يتقلص حد الأفق $\sqrt{h_1}$ 4.12 وتحجب المباني خط البصر، فينخفض المدى انخفاضًا حادًا، خاصة للطائرات المنخفضة.