

من 12 إلى 18 سنة - للمعلم

# فك شفرة السماء: الفيزياء والحوسبة عبر نظام حقيقي واحد

خمس دروس ومشروع. يأخذ كل درس جزءًا واحدًا من ADS-B ويطور الفيزياء أو الحوسبة الكامنة وراءه تطويرًا كاملاً: اشتقاقات حيث يستطيع الفصل متابعتها، وأمثلة محلولة بأرقام حقيقية، والعروض العملية التي تجعل الفكرة قابلة للرصد، والمواضع التي يخطئ فيها حدس الطلاب. يتابع الطرف الأصغر من الفئة (12 إلى 14) الأفكار والحساب؛ ويتابع الطرف الأكبر (15 إلى 18) الاشتقاقات وينفذ المشروع.

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

## المحتويات

|                                                                                              |                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| الدرس 4 - فيزياء الانتشار والمدى: انحناء الأرض وقانون التربيع العكسي                         | قبل أن تبدأ: لماذا يستحق نظام حقيقي واحد خمسة دروس                                               |
| الدرس 5 - فيزياء وهندسة الهوائيات والمستقبلات: من موجة طولها 27 سنتيمترًا إلى نقطة على خريطة | الدرس 1 - فيزياء الموجات والطيف الكهرومغناطيسي: ما تسافر عليه الرسالة                            |
| مشروع - من أسبوعين إلى أربعة ابن مستقبلًا واختبر الفيزياء في مواجهة السماء                   | الدرس 2 - فيزياء ورياضيات التوقيت والموقع: كيف تعرف الطائرة مكانها، وكيف تجد شبكة طائرة لا تقوله |
| إجابات تحديثات الطالب                                                                        | الدرس 3 - حوسبة الرسالة الرقمية: 112 بتًا، كيف تُرسل، وكيف تُلتقط الأخطاء                        |
| التالي المشروع، خطوة خطوة                                                                    |                                                                                                  |

## قبل أن تبدأ: لماذا يستحق نظام حقيقي واحد خمسة دروس

معظم الفيزياء التي تُدرّس بين 12 و18 سنة تُدرّس مجزأة: وحدة عن الموجات هنا، وواحدة عن الطيف الكهرومغناطيسي هناك، وموضوع عن البيانات الرقمية في الحوسبة، وذكر للأقمار الاصطناعية في الجغرافيا. وADS-B نظام عامل واحد تكون فيه كل تلك الأجزاء حاملة للبنية في آن واحد، ويستطيع الفصل فيه رصد النتيجة بمستقبل يكلف أقل من كتاب مدرسي. تحدّد الطائرة موقعها بتوقيت إشارات راديوية من أقمار اصطناعية، وهذا هو التثليث بالمسافات وسرعة الضوء. وترمز النتيجة في 112 بتًا مع فحص تكرار دوري، وهذا هو الترميز الثنائي وكشف الأخطاء. وترسلها كموجة راديوية بتضمين موضع النبضة على 1090 MHz، وهذا هو الطيف والتردد والطول الموجي. وتصل الموجة إلى المستقبل فقط على امتداد خط مستقيم يتجاوز انحناء الأرض، وتصل أضعف بمربع المسافة عكسيًا، وهذا هو الهندسة والطاقة. ويحوّلها هوائي مضبوط بطول ربع موجة إلى تيار، وهذا هو الرنين. وتستطيع شبكة من المستقبلات تحديد موقع حتى مرسل صامت من فروق أزمنة الوصول، وهذا هو مسألة الأقمار الاصطناعية مقلوبة. يأخذ كل درس أدناه واحدة من هذه ويطورها بحد ذاتها، مع ADS-B مثالًا جاريًا لا زينة.

تقدّم الدورة المرجعية في الصفحة الرئيسية النظام كله في صيغة سردية، وينبغي أن يقرأ الفصل فصليها 3 و5 قبل الدرس 3 وفصولها 6 إلى 8 قبل الدرسين 4 و5؛ ومسرّد مصطلحاتها نشرة مفيدة. وتفترض هذه الصفحة أنك قرأتها وتركّز على الفيزياء والتدريس. والاصطلاحات العددية متّسقة في كل الدورة:  $c = 3.00 \times 10^8$  m/s، و  $f = 1090$  MHz، والارتفاعات بالأمتار، والمسافات بالكيلومترات، والطائرة في طيرانها الاعتيادي على ارتفاع 11,000 m (مستوى الطيران 360) وبسرعة 250 m/s ما لم يذكر المثال غير ذلك.

تحذيران بشأن الحدس. يصل الطلاب وهم يعتقدون أن الموجات الراديوية نوع من الصوت وأن «الرادار» أو «الأقمار الاصطناعية» ترى الطائرات. كلاهما خاطئ، وكلاهما يُعالج صراحة في الدرسين 1 و2، وكلاهما سيعاود الظهور؛ وصُممت الدورة بحيث يمنحك كل درس لاحق سببًا جديدًا لتصحيحهما. والطلاب المرتاحون للمعادلات غالبًا غير مرتاحين للمقادير: تعتمد الدورة اعتمادًا كبيرًا على سؤال «كم مقدار ذلك؟» في كل خطوة، لأن 300 m في الميكروثانية، و145 dB من فقد المسار، و $24^2$  عنوانًا هي الأرقام التي تجعل الفيزياء تبدو حقيقية.

## الدرس 1 - فيزياء

### الموجات والطيف الكهرومغناطيسي: ما تسافر عليه الرسالة

ابدأ من الملاحظة التي تقوم عليها الدورة كلها: رسالة الطائرة الراديوية وحزمة الضوء الظاهرة الفيزيائية نفسها. كلاهما موجة كهرومغناطيسية، مجالات كهربائية ومغناطيسية متذبذبة تنتشر عبر الفضاء من دون أي وسط، بسرعة  $c$  واحدة لكل تردد في الفراغ وتكاد تكون كذلك في الهواء:  $299,792,458 \text{ m/s}$ ، ويمكن للفصل اعتبارها  $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ . والكمية التي تميز الراديو عن الضوء المرئي، والضوء المرئي عن الأشعة السينية، هي فقط تردد التذبذب  $f$ . تستجيب شبكاتنا لترددات بين نحو  $4 \times 10^{14}$  و  $8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ، ندركها من الأحمر إلى البنفسجي؛ ويُرسل ADS-B على  $1.09 \times 10^9 \text{ Hz}$ ، أي أدنى بنحو نصف مليون مرة. لا شيء في الموجة مختلف في نوعه؛ أعيننا وحدها انتقائية.

اشتق معادلة الموجة للفصل بدلاً من ذكرها. إذا سارت موجة بسرعة  $c$  وتذبذبت  $f$  مرة في الثانية، فإنها في ثانية واحدة تكون قد تقدّمت مسافة  $c$  وأنتجت  $f$  دورة كاملة؛ فتشغل كل دورة إداً طولاً قدره  $c / f$ . ذلك الطول هو الطول الموجي،  $\lambda$ ، ومن ثم  $c = f \times \lambda$ . وبتطبيقها على  $\lambda = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275 \text{ m}$ . فالرسالة بين الطائرة والمستقبل قممها متباعدة  $27.5 \text{ cm}$ . اجعل الفصل يضع ذلك على طيف يرسمونه بأنفسهم، على محور لوغاريتمي: إذاعة FM عند  $100 \text{ MHz}$  و  $3 \text{ m}$ ، وADS-B عند  $1,090 \text{ MHz}$  و  $27.5 \text{ cm}$ ، والهواتف المحمولة عند  $1,800 \text{ MHz}$  و  $17 \text{ cm}$ ، وWi-Fi وأفران الميكروويف عند  $2,450 \text{ MHz}$  و  $12 \text{ cm}$ ، والأشعة تحت الحمراء، والضوء المرئي عند  $5.6 \times 10^{14} \text{ Hz}$  و  $540 \text{ nm}$ ، وهكذا حتى الأشعة السينية. وتمرين وضع موجة الطائرة بين هاتف وفرن يساوي أكثر من أي جدول، لأنه يرشّخ أن هذه جيران.

واجه الآن خلط الصوت مباشرة، لأنه عام ولأن التباين يُعلّم الظاهرتين معًا. الصوت موجة ضغط طولية في وسط؛ وسرعته خاصية الوسط،  $343 \text{ m/s}$  في الهواء عند  $20$  درجة، ونحو  $1,500 \text{ m/s}$  في الماء، وصفر في الفراغ. والراديو موجة كهرومغناطيسية مستعرضة لا تحتاج إلى أي وسط، تسير بسرعة  $c$  في الفراغ وأبطأ بقدر لا يُذكر في الهواء. ضع رقمًا للفجوة:  $3.00 \times 10^8$  مقسومًا على  $343$  يساوي نحو  $875,000$ . وطائرة على بعد  $30 \text{ km}$  تُصدر صوتًا ورسالة في اللحظة نفسها توصل الرسالة في  $100$  ميكروثانية والصوت في  $87$  ثانية؛ وعندما يصل الصوت تكون الطائرة قد طارت  $22 \text{ km}$ . والعرض العملي حبل في الفصل ومصباح يدوي عبر الملعب: موجة الحبل تحتاج إلى الحبل بوضوح وتسير بسرعة يحددها الحبل، وومضة المصباح تصل إلى الطرف البعيد من دون تأخر يستطيع أحد قياسه. اذكر صراحة ما يشترك فيه الحبل مع الضوء (موجة، وطول موجي، وتردد، وسرعة ثابتة ومن ثم علاقة عكسية بين  $f$  و  $\lambda$ ) وما لا يشترك فيه (وسط، وسرعة بأمطار في الثانية).

اختم بالاستقطاب، الذي يسهل عرضه ويؤتي ثماره في الدرس 5. يتذبذب المجال الكهربائي للموجة الكهرومغناطيسية في اتجاه محدد عمودي على اتجاه انتقالها. هوائيات المرسلات المستجيبة في الطائرات رأسية، فموجة ADS-B مستقطبة رأسيًا؛ ويجب أن يكون هوائي الاستقبال رأسيًا أيضًا، وإذا أُدير أفقيًا لا يكاد يسمع شيئًا. موجة حبل تُهزّ رأسيًا تمرّ عبر شقّ رأسي في صندوق كرتوني وتوقّف بشقّ أفقي؛ وقطعتان من فيلم مستقطب (من نظارات ثلاثية الأبعاد رخيصة) متقاطعتان أمام نافذة تبيّنان الشيء نفسه للضوء. اطلب من الفصل أن يتنبأ بما يحدث للاستقبال إذا وُضع هوائي الاستقبال مستلقيًا. سيختبرون التنبؤ في المشروع.

### مثال محلول للتكليف

يُرسل نظام ADS-B الثاني، الذي تستخدمه الطائرات الخفيفة في الولايات المتحدة، على 978 MHz. ما طوله الموجي، وكم يكون طول هوائي ربع موجي له؟ (0.307 m؛ 7.7 cm). الطالب الذي يستطيع حلّ هذا قد أُنقن الدرس 1.

### الدرس 2 - فيزياء ورياضيات

## التوقيت والموقع: كيف تعرف الطائرة مكانها، وكيف تجد شبكة طائرة لا تقوله

كل ما تبثّه الطائرة عن موقعها يأتي من الملاحة بالأقمار الاصطناعية، والملاحة بالأقمار الاصطناعية هي، في جوهرها، قياس للزمن. يحمل كل قمر GNSS، يدور على ارتفاع نحو 20,200 km، ساعة ذرية ويبث إشارة تذكر موقعه ولحظة الإرسال بالضبط. ويسجل المستقبل لحظة الوصول. والفرق، مضرّوباً في c، هو المسافة إلى ذلك القمر، ومسافة واحدة كهذه تضع المستقبل على كرة بذلك نصف القطر مركزها القمر. دع الفصل يشقّ العدّ: كرتان تتقاطعان في دائرة، وثلاث في نقطتين، إحداهما بعيدة عن سطح الأرض ويمكن استبعادها. فتكفي ثلاثة أقمار، بشرط ساعة مثالية في المستقبل. وليس له شيء من هذا القبيل؛ فمذبذب الكوارتز ينحرف بأكثر بكثير من النانوثواني المطلوبة. والحل، وهو قلب الموضوع الأنيق، هو معاملة خطأ ساعة المستقبل مجهولاً رابعاً واستخدام قمر رابع: أربع معادلات في أربعة مجاهيل (x و y و z وإزاحة الساعة)، تُحلّ باستمرار. فيحتاج مستقبل GNSS إذاً إلى أربعة أقمار في مجال رؤيته، ويحافظ، نتيجةً جانبية، على الوقت ضمن عشرات النانوثواني، ولهذا تستخدم المستقبلات في شبكة الدرس 5 الأقمار نفسها التي تستخدمها الطائرة لساعاتها.

ضع المقادير على السبورة وعد إليها باستمرار. يقطع الضوء 0.300 m في النانوثانية و300 m في الميكروثانية. وخطأ توقيت بميكروثانية واحدة خطأ مدى قدره 300 m؛ ودقة الأمتار القليلة في مستقبل حديث تقابل توقيتاً عند مستوى عشر نانوثوانٍ. وزمن الانتقال من قمر فوق الرأس مباشرة هو  $20,200 \text{ km} / 3.00 \times 10^5 \text{ km/s} = 0.0673 \text{ s}$ ، ومن قمر قرب الأفق نحو 0.086 s، فالمستقبل يقيس فروقاً من بضع ميلي ثوانٍ بدقة جزء من مئة مليون منها. اسأل الفصل ماذا يحدث لو كانت ساعة قمر متقدّمة بميكروثانية واحدة؛ ينبغي أن يروا أن كل مستقبل يستخدمه سيُدفع نحو 300 m على امتداد الخط نحوه، ولهذا تُصحّح ساعات الأقمار من الأرض عدة مرات في اليوم.

افصل بين الارتفاعين، لأن الرسالة تحمل كليهما والطلاب يسألون دائماً. يعطي حلّ الأقمار الاصطناعية ارتفاعاً هندسياً فوق الإهليلج المرجعي للأرض. ومع ذلك تبثّ الطائرات عن الارتفاع البارومتري: الضغط الساكن خارج جسم الطائرة محوّل إلى ارتفاع عبر الغلاف الجوي القياسي الدولي، الذي يفترض 1013.25 hPa و15 درجة عند مستوى سطح البحر وانخفاضاً قدره 6.5 درجة لكل كيلومتر. وفي يوم يختلف فيه 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 أيّاً كان الطقس. تحمل رسائل موقع ADS-B الارتفاع البارومتري بخطوات من 25 قدماً؛ وتحمل رسالة السرعة الفرق بين الارتفاع البارومتري والهندسي، فيستطيع المستقبل استعادة الاثنين. وللمجموعة الأكبر، تصلح علاقة  $p = p_0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^{5.255}$  ISA تقريباً جيداً بجدول بيانات: عكسها لإيجاد h من p وتحقق من أن 11,000 m تقابل نحو 227 hPa، أي خمس ضغط مستوى سطح البحر.

اقلب المسألة الآن رأساً على عقب. ترسل بعض الطائرات على 1090 MHz من دون موقع من الأقمار الاصطناعية: مرسلات مستجيبة أقدم تردّ على الرادار بالهوية والارتفاع فقط، أو طائرات يُشوّش على GNSS فيها. وتستطيع شبكة من المستقبلات تحديد موقعها مع ذلك. افترض أن أربعة مستقبلات ذات ساعات متزامنة تسجّل زمن وصول الإرسال نفسه. المرسل مجهول، والمستقبلات معلومة: هذه مسألة GNSS بتبادل أدوار المعلوم والمجهول. الرسالة التي وصلت إلى المستقبل A قبل المستقبل B بميكروثانية واحدة أرسلت من نقطة أقرب إلى A منها إلى B بمقدار 300 m، والمحل الهندسي لتلك النقاط سطح زائدي بؤرتاه A وB. وثلاثة أزواج مستقلة من أربعة مستقبلات تعطي ثلاثة سطوح زائدية، تقاطعها هو الطائرة. هذا هو التحديد متعدّد المواقع (multilateration)، ويحتاج إلى اتفاق ساعات المستقبلات ضمن نحو 100 ns، وهو ما تحصل عليه من الأقمار الاصطناعية. وللفضل، اختزله إلى بعدين

بتمرين الملعب: ثلاثة طلاب بإيقاف عند نقاط مساحية معلومة، ورابع مختبئ في مكان ما يصفق، ويسجل الثلاثة تأخيراتهم مصححة من زمن رد الفعل، ويرسم الفصل القطوع الزائدة (أو، ببساطة أكبر، يستخدم مواقع تجريبية على رسم بمقياس) للعثور على المصفق، باستخدام 343 m/s. ثم اسأل كم يجب أن تكون دقة التوقيت لفعل الشيء نفسه بالراديو على مدى 200 km، ودعهم يستشعرون الفجوة بين ساعة إيقاف وساعة ذرية.

### مثال محلول للتكليف

مستقبلان يبعد أحدهما عن الآخر 60 km يسجلان رسالة بفارق 50 ميكروثانية. بكم كانت الطائرة أقرب إلى المستقبل الأول؟ (15 km). لو كانت الساعتان خاطئتين إحداها نسبة إلى الأخرى بميكروثانية واحدة، فما الخطأ الذي يضعه ذلك في الجواب؟ (300 m). الطالب الذي يستطيع شرح لماذا لا يعتمد الجواب الثاني على المسافة قد فهم ما يتطلبه التحديد متعدد المواقع.

### الدرس 3 - حوسبة

## الرسالة الرقمية: 112 بتًا، كيف تُرسل، وكيف تُلَقط الأخطاء

يرسل المرسل المستجيب في الطائرة بيانات ADS-B على شكل سكويتر ممدد في Mode S: مقدمة من 8 ميكروثوانٍ تليها 112 بتًا من البيانات بمعدل بت واحد بالضبط في الميكروثانية. ابدأ الدرس بالمقدمة، لأنها تجيب عن سؤال لم يفكر الطلاب بعد في طرحه: كيف يعرف المستقبل أن رسالة بدأت، والقناة مليئة بالضوضاء وبطائرات أخرى؟ المقدمة نمط ثابت من أربع نبضات عند 0 و 1 و 3.5 و 4.5 ميكروثانية. ويبحث المفكك باستمرار عن ذلك النمط؛ وعندما يجده، يعرف أن رسالة تليه ويعرف بدقة متى تبدأ كل فتحة بت. ولكل بروتوكول رقمي التقاه الطلاب، من Wi-Fi إلى QR، ما يعادلها، وهذه لحظة مناسبة لقول ذلك.

ثم التضمين. يمكن لجهاز راديو أن يكون مشغلاً أو مطفأ؛ فكيف ترسل 1 أو 0؟ يستخدم ADS-B تضمين موضع النبضة: تُقسم كل فتحة بت مدتها ميكروثانية واحدة إلى نصفين، ونبضة في النصف الأول يتبعها صمت تعني 1، وصمت يتبعه نبضة تعني 0. ارسم بضعة بتات على السبورة كنبضات واجعل الفصل يقرأها. ثم اسأل لماذا هذا أفضل من المخطط البديهي «نبضة تعني 1، لا نبضة تعني 0». يظهر سببان ببعض التحفيز. هناك دائمًا نبضة واحدة بالضبط لكل بت، فيستطيع المستقبل إبقاء توقيته مقفلاً حتى عبر سلسلة من الأصفار، ويستطيع تقرير كل بت بسؤال أي النصفين كان أعلى بدلاً من ما إذا كانت نبضة قد تجاوزت عتبة مطلقة ما، وهذا يجعل فك الترميز غير حساس لمدى قوة الإشارة. وسلسلة طويلة من الأصفار في المخطط الساذج لا تُميز عن الصمت؛ أما في PPM فهي قرع طبل منتظم من نبضات النصف الثاني.

### 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.

والآن تخطيط البتات الـ 112، الذي ينبغي أن يستطيع الفصل استرجاعه من الذاكرة بنهاية الدرس. البتات من 1 إلى 5 هي صيغة الوصلة الهابطة، 17 ADS-B من مرسل مستجيب. والبتات من 6 إلى 8 رمز القدرة. والبتات من 9 إلى 32 عنوان الإيكاو المكوّن من 24 بتًا، هوية الطائرة الدائمة. والبتات من 33 إلى 88 حقل الرسالة المكوّن من 56 بتًا، وبتاته الخمسة الأولى، رمز النوع، تقول ما تحويه الـ 51 المتبقية: رسالة التعريف (رموز النوع من 1 إلى 4) تحمل رمز النداء من ثمانية محارف كثنائية محارف من 6 بتات؛ والموقع الجوي (من 9 إلى 18) يحمل 12 بتًا من الارتفاع البارومتري، وراية تقول ما إذا كان هذا إطارًا زوجيًا أم فرديًا، و 17 بتًا لكل من خط العرض وخط الطول المرّمزين؛ ورسالة السرعة (19) تحمل مرّكبي السرعة الأرضية شرق-غرب وشمال-جنوب، والمعدل الرأسية،

والفرق بين الارتفاع البارومتري والهندسي. والبتات من 89 إلى 112 التكافؤ المكوّن من 24 بتًا. كلف بالحساب: 24 بتًا من العنوان تعطي  $24^2 = 16,777,216$  طائرة؛ وثمانية محارف من 6 بتات تسمح بـ 64 رمزًا لكل منها، ما يكفي للحروف والأرقام والمسافة؛ و12 بتًا من الارتفاع بخطوات من 25 قدمًا تغطي 102,400 قدم؛ و17 بتًا من خط العرض، إن استُخدمت بسداجة على 180 درجة، لن تميّز إلا 1.4 km، وهذا يطرح السؤال الذي يجيب عنه الإبلاغ المضغوط عن الموقع. اشرح CPR في فقرة واحدة: تعطي البتات الـ 17 الموقع داخل منطقة إلى بضعة أمتار، لا أي منطقة؛ وتتناوب الطائرة بين شبكتي مناطق، زوجية وفردية، والمستقبل الذي لديه واحدة من كل نوع يستطيع تحديد المنطقة من دون لبس ثم التتبع من رسائل مفردة. إنه مثال بارع على الحصول على دقة أكبر من البتات نفسها باستخدام الزمن.

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

أعطِ الفصل رسالة حقيقية ودعمهم يشرّحونها. السلسلة الست عشرية 8D4840D6202CC371C32CE0576098 هي رقمًا ست عشريًا، أي 112 بتًا. تحويل الرقمين الأولين، 8D، إلى الثنائي يعطي 10001101: البتات الخمسة الأولى 10001 تعطي DF = 17، والثلاثة التالية 101 تعطي CA = 5. والأرقام الستة التالية، 4840D6، هي عنوان الإيكاو، الذي تخصّصه جداول التوزيع لهولندا. والأرقام التالية، 20،... تبدأ بـ 00100، رمز النوع 4، رسالة تعريف، وفكّ ترميز المحارف ذات الـ 6 بتات التي تليها يعطي رمز النداء KLM1023. والأرقام الستة الأخيرة، 576098، هي التكافؤ. ويستطيع فصل بجدول بيانات أو بضعة أسطر من Python إجراء فكّ الترميز كله في حصة واحدة، والقدرة على أخذ سلسلة ست عشرية والقول «تلك طائرة KLM تعلن رقم رحلتها» هي الناتج المستهدف.

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: صيغة الوصلة الهابطة 17، القدرة 5. 4840D6: عنوان الإيكاو، مخصّص لهولندا. 20...: رمز النوع 4، تعريف، رمز النداء. KLM1023. 576098: التكافؤ من 24 بتًا.

اختتم بالتكافؤ، لأنه الفكرة الحاسوبية الأجدر بالتطوير. فوق مطار مزدحم، تتداخل رسائل من طائرات مختلفة عند المستقبل باستمرار، وتضيع نبضات أيضًا بسبب الضوضاء؛ ولا بد أن يجمع المفكّك بتات خاطئة أحيانًا. والحقل المكوّن من 24 بتًا في النهاية فحص تكرار دوري: تُعامل بتات الرسالة الـ 88 كعدد ثنائي طويل ويُقسم، في حساب خاص يكون فيه الطرح هو «أو الحصري» (XOR)، على مولّد ثابت من 25 بتًا؛ والباقي هو CRC. يعيد المستقبل القسمة على البتات التي فكّ ترميزها ويقارن. وأي بت واحد تالف، وأي بتين، وأي دفقة أخطاء بطول يصل إلى 24 بتًا تغيّر الباقي، فتُرفض الرسالة التالفة. اعرض الفكرة بمقياس صغير بفحص CRC من 4 بتات على رسالة من 8 بتات يدويًا، أو بالنظر الأبسط، رقم التحقق في الرمز الشريطي؛ ثم اجعل المجموعة الأكبر تنقذ CRC-24 الحقيقي في بضعة أسطر من الشفرة وتتحقّق من أن تكافؤ الرسالة المثال يخرج صحيحًا، وأن قلب بت واحد يُخفّقه. هذا هو كشف الأخطاء كما يفعله كل نظام حديث، في سياق قد يضع فيه خطأ فائت طائرة شبكًا على شاشة مراقب.

### مثال محلول للتكليف

كم يدوم الإرسال الكامل، وإذا أرسل مرسل مستجيب 4.5 سكويتر ممدّد في الثانية، فما نسبة الوقت التي يرسل فيها ADS-B (120 ميكروثانية؛ 540 ميكروثانية في الثانية، 0.054 بالمئة). كم طائرة يمكن من حيث المبدأ أن تشارك القناة قبل أن تصبح مشغولة باستمرار، مع تجاهل كل ما يُرسل عليها غير ذلك؟ (نحو 1,850، ولهذا يكون الازدحام فوق أكثر المجالات الجوية انشغلاً شاغلًا هندسيًا حقيقيًا).

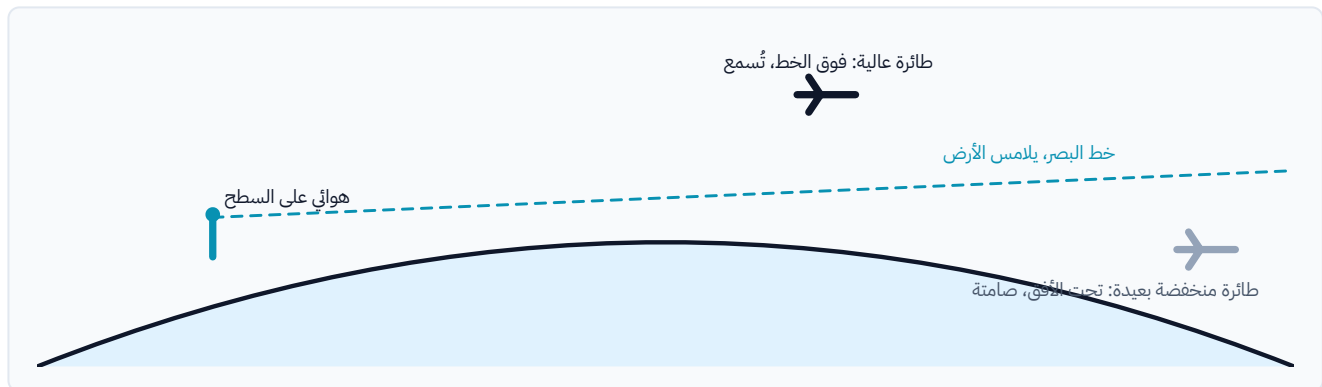
## الدرس 4 - فيزياء

## الانتشار والمدى: انحناء الأرض وقانون التربيع العكسي

من أي بعد يستطيع مستقبل سماع طائرة؟ للسؤال جوابان مستقلان، هندسي وطاقي، وغرض الدرس اشتقاقهما معًا واكتشاف أن المصممين رتبوا لهما أن يتفقا. خذ الهندسة أولًا. عند 1090 MHz لا يحيد الراديو حول الأرض بشكل مفيد؛ يسلك سلوك الضوء ويسير في خطوط مستقيمة. فلا يستطيع المستقبل إذا سماع إلا الطائرات فوق أفقه، أي الطائرات التي لا يمر الخط المستقيم منها إلى الهوائي عبر الأرض. اشتق مسافة الأفق مع الفصل. هوائي على ارتفاع  $h$  فوق كرة نصف قطرها  $R$  يرى أفقًا حيث يكون خط بصره مماسًا للكرة. وبشكل المماس ونصف القطر إلى نقطة التماس ونصف القطر إلى الهوائي زاوية قائمة عند نقطة التماس، فبفيثاغورس  $d^2 + R^2 = (R + h)^2$ ، ما يعطي  $d^2 = 2Rh + h^2$ . ولأن  $h$  ضئيلة إلى جانب  $R$ ، فإن  $d = \sqrt{2Rh}$ . وبـ  $R = 6,371 \text{ km}$  و  $h$  بالأمتار، تكون  $d$  بالكيلومترات  $d = \sqrt{2 \times 6371 \times h} = 3.57 \sqrt{h}$ . وتنخفض كثافة الغلاف الجوي، ومن ثمّ معامل انكساره، مع الارتفاع، فينحني الشعاع الراديوي قليلًا نحو الأسفل؛ 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:

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

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:  $4.12 \times (4.47 + 31.6) = 149 \text{ km}$ . 30 km طائرة على المدرج على بعد 30 km:  $4.12 \times (4.47 + 2) = 27 \text{ km}$ . فلا تُسمع.



اجعل الفصل يرسم  $d$  بدلالة  $h_2$  لارتفاع هوائي مدرستهم؛ والمنحنى، الحادث في البداية ثم المتسطح، يفسّر شكل تغطية كل مستقبل: دائرة بقطر 400 km وأكثر للحركة في الطيران الاعتيادي، وبضع عشرات من الكيلومترات للطائرات في مرحلة الاقتراب، ولا شيء على الأرض إلا في المطار المجاور. ويفسّر أيضًا لماذا يهم الارتفاع أكثر من أي خاصية أخرى للمستقبل، ولماذا يقطع تلّ بينك وبين المطار، أو جناح الطائرة نفسها عندما تميل بعيدًا، المسار في الحال. وعرض الملعب من دورة المرحلة الابتدائية، الرؤية الأبعد من مقعد مقارنة بالقرصاء، ليس دون مستوى هذه الفئة العمرية إن أتبعته بالاشتقاق؛ والنقطة أنهم الآن يعرفون لماذا.

والآن الطاقة. يُشعّ المرسل المستجيب قدرة ذروة تبلغ بضع مئات من الواط، بتوزيع متجانس تقريبًا في كل الاتجاهات الأفقية. وعند المسافة  $d$  تكون تلك القدرة قد انتشرت على كرة مساحتها  $4\pi d^2$ ، فتتخفض القدرة التي يعترضها هوائي ذو مساحة فعّالة ثابتة بنسبة  $1/d^2$ : قانون التربيع العكسي، الذي ينبغي أن يشتقّه الفصل من مساحة الكرة لا أن يحفظه. ضعف المسافة، ربع القدرة؛ عشرة أضعاف، جزء من مئة. ويعبّر مهندسو الراديو عن الفقد بين مرسل متماثل المناخى ومستقبل متماثل المناخى بالديسيبل، والمعادلة القياسية، التي يمكن للمجموعة الأكبر أخذها مسلمة أو اشتقاقها من المساحة الفعّالة للهوائي،  $\lambda^2 / 4\pi$ ، هي:

$$( \text{بالميغاهرتز } f ) + 20 \log_{10}( d \text{ بالكيلومترات} ) + 20 \log_{10}( \text{فقد المرسال } dB ) = 32.44$$

dBm؛ هو W 54+ مرسل بقدرة 250 dB.  $20 \times 2.60 + 20 \times 3.04 + 32.44 = 52.0 + 60.7 + 32.4 = 145$  dB. 1090 MHz و 1090 km عند 400؛ أو جزء من مليون من المليون من الواط،  $10^{-13} \text{ W}$  أي نحو 8 dBm، والقدرة المستقبلية 54 - 145 = 91.

اقتض بضع دقائق على الديسبيل إن لم يلتقه الفصل من قبل، لأنه يحوّل ضرباً عبر أربع عشرة مرتبة من المقادير إلى جمع، ولأن الرقم نفسه معبّر: مستقبل على سطح يكتشف إشارة أضعف بـ  $10^{14.5}$  مرة من تلك التي غادرت الطائرة. ويستطيع مستقبل هواة جيد فكّ الترميز حتى نحو -100 dBm، فهناك نحو 9 dB من الاحتياطي عند 400 km، أي أن الحدّ الطاقوي والأفق الهندسي لطائرة ركاب في طيرانها الاعتيادي يقعان في المكان نفسه. وهذا ليس مصادفة؛ فقد حُدّدت قدرة المرسل المستجيب ومعايير المستقبلات بحيث تكون الطائرة مسموعة حتى الأفق وليس أبعد منه بكثير، وهذا يمنع إغراق القناة بإرسالات من البلد المجاور.

تهذيان للمجموعة الأكبر. الأول، دوبلر: طائرة تقترب بسرعة 250 m/s تزيح التردد المستقبل بمقدار  $1.09 \times 10^9 \times f \times v / c = 908 \text{ Hz}$   $= 250 / 3 \times 10^8$ ، أي أقل من جزء في المليون من الحامل، وهو ما لا يلاحظه المستقبل أبداً؛ قارن هذا بإزاحة دوبلر المسموعة لصوت الطائرة، حيث  $v / c$  تساوي 343 / 250 وتتغيّر طبقة الصوت بمعظم أوكتاف وهي تمرّ. الثاني، زمن انتقال الإشارة: 400 km بسرعة c هي 1.33 ms، فالموقع في الرسالة عمره أصلاً 1.33 ms، تحركت خلالها الطائرة 33 cm؛ أمر مهم للخرطة، وحاسم للتحديد متعدّد المواقع في الدرس 2، الذي يعيش على هذه الميكروثواني بالذات.

### مثال محلول للتكليف

مستقبل على سارية بارتفاع 10 m يسمع طائرة في طيرانها الاعتيادي على ارتفاع 11,000 m لكن لا يسمع طائرة خفيفة على ارتفاع 600 m تبعد 130 km. هل الطائرة الخفيفة تحت الأفق؟ (الأفق:  $4.12 \text{ km} = (3.16 + 24.5) \times x$ ، فنعم.) كم يجب أن يرتفع المستقبل لسمعها؟ (نحتاج إلى  $4.12 \times 130 = (3.16 + 24.5) \times x$ ، ف  $h_1 = 50 \text{ m}$ ،  $\sqrt{h_1} = 7.05$ ).

### الدرس 5 - فيزياء وهندسة

## الهوائيات والمستقبلات: من موجة طولها 27 سنتيمتراً إلى نقطة على خريطة

الهوائي موصل تحت فيه الموجة الكهرومغناطيسية المازة تياراً متناوياً؛ وهوائي الاستقبال وهوائي الإرسال الجهاز نفسه يعمل في اتجاهين متعاكسين، وهي تبادلية ينبغي إخبار الفصل بها صراحة. ويكون التيار المحثوث أكبر ما يكون عندما يرنّ الموصل: عندما يكون طوله بحيث يتطابق توزيع التيار على امتداده مع تذبذب الموجة، تمامًا كما يرنّ وتر بالطول المناسب مع نغمة معيّنة أو أرجوحة مع إيقاع معيّن من الدفعات. والرنين الأساسي لموصل مستقيم عند نصف طول موجي، 13.75 cm عند 1090 MHz، مع تيار أعظمي في المنتصف وصفري عند الطرفين. وهوائي ADS-B العملي، على الطائرة وعلى معظم المستقبلات، هوائي أحادي القطب ربع موجي: عنصر رأسي طوله 6.9 cm قائم على مستوى أرضي موصل، يعكسه كهربائياً بحيث يشكّل العنصر وصورته معاً ثنائي القطب نصف الموجي. وعلى الطائرة يكون جسمها هو المستوى الأرضي؛ والهوائي المشتري لـ 1090 MHz يخفي الهندسة نفسها داخل أنبوبه، مرصوفة عدة مرات لتركيّز حساسيته نحو الأفق. ونموذج يُبنى في الفصل من قضيب بطول 6.9 cm على غطاء علبة معدنية يبيّن الهندسة والطول، مقيّساً بمسطرة في مقابل موجة طولها 27.5 cm؛ غير أن مستقبل المشروع يستخدم الهوائي المضبوط في المصنع، لأن بضعة مليمتترات من الخطأ تخرج الهوائي المصنوع في البيت عن الضبط فلا يسمع إلا جزءاً يسيراً من السماء.

طوّر نمط الإشعاع، لأنه يتنبأ بشيء يستطيع الفصل رصده. يُشعّ الهوائي أحادي القطب الرأسي ويستقبل بأقوى شكل نحو الأفق ولا يفعل على الإطلاق على امتداد محوره؛ وحساسيته، مرسومة في الأبعاد الثلاثة، كعكة حلقيه والهوائي يمرّ عبر ثقبها. فيسمع المستقبل عادة طائرات على بعد 300 km بشكل تام ويفقد طائرة تمرّ فوقه مباشرة لبضع ثوانٍ، ويستطيع الفصل مشاهدة ذلك يحدث على

مستقبله. والهوائي الخطي المتراض، عدة عناصر رنانة مرصوفة، يضغط الكعكة لتصير أكثر تسطحًا، فيزيد الحساسية عند الأفق حيث الطائرات البعيدة، على حساب الثقب فوق الرأس: هذا هو كسب الهوائي، معبرًا عنه بـ dB، وهو يأتي من إعادة توزيع الحساسية، لا من خلقها أبدًا. وللاستقطاب، من الدرس 1، نتيجة عملية الآن سيختبرها المشروع: يجب أن يكون الهوائي رأسيًا.

بين الهوائي والحاسوب ثلاث مراحل، كل منها درس صغير. مرشح تمرير نطاق يمرر 1090 MHz ويرفض إرسالات الهاتف المحمول الأقوى بكثير على بعد بضعة مئات من الميغاهرتز، التي كانت ستشبع المضخم لولاه. ومضخم منخفض الضوضاء، موضوع عند الهوائي لا عند المستقبل، يضاعف الإشارة ألف مرة قبل دخولها الكابل؛ والترتيب مهم، لأن الكابل المحوري عند 1090 MHz يفقد نحو نصف الإشارة، أي 3 dB، كل عشرة أمتار، والتضخيم بعد الفقد سيضخم ضوضاء الكابل مع الإشارة. ثم الراديو المعرف بالبرمجيات: جهاز USB بسعر 20 يورو صُنع أصلاً موالف تلفاز، يخلط الإشارة نزولاً إلى النطاق الأساسي ويعاينها مليوني مرة في الثانية إلى سيل من الأرقام. ومن تلك النقطة تصير مشكلة الراديو مشكلة برمجة. تسمح برمجيات مجانية سيل العينات بحثًا عن نمط المقدمة، وتقيس أي نصفي كل فتحة ميكروثانية يحمل طاقة أكبر، وتجقق 112 بتًا، وتحسب CRC، وإن نجح، تفكّ ترميز الحقول. ثم يقرن متعقب إشارات الموقع الزوجية والفردية، ويدمج الموقع والسرعة والتعريف بعنوان الإيكاو، ويحتفظ بحالة كل طائرة حتى تتوقف الرسائل عن الوصول.

أعط السلسلة للفصل كرسم يرسمونه بأنفسهم، مع الكمية عند كل مرحلة: نانوفولتات من التيار المتناوب عند الهوائي؛ وميكروفولتات بعد المضخم؛ ومليوناً عدد من 8 بتات في الثانية من SDR؛ وإطارات من 112 بتًا من المفكك، ربما بضعة مئات في الثانية؛ وسجل واحد لكل طائرة من المتعقب. والنقطة التي يجب ترسيخها أن النقطة على الخريطة هي الطرف البعيد لسلسلة كل حلقة فيها فكرة يفهمونها الآن: الرنين، والترشيح، والتضخيم، والمعينة، ومطابقة الأنماط، وفكّ الترميز، وفحص الأخطاء، والتجميع.

#### مثال محلول للتكليف

يفقد كابل 3 dB لكل 10 m عند 1090 MHz. فما نسبة الإشارة التي يفقدها مد بطول 20 m (6 dB، ثلاثة أرباع). إذا كان حدّ المستقبل -100 dBm والإشارة عند الهوائي من طائرة على بعد 400 km هي -91 dBm، فهل تستطيع الإشارة النجاة من الكابل من دون مضخم؟ (بالكاد: -97 dBm. وأي فقد إضافي، مطر على الموصلات أو مد أطول، وتختفي الطائرة عند الأفق. ولهذا يوضع المضخم عند الهوائي).

مشروع - من أسبوعين إلى أربعة

## ابن مستقبلاً واختبر الفيزياء في مواجهة السماء

يحوّل المشروع الدروس الخمسة إلى قياسات. المعدّات دونغل USB للراديو المعرف بالبرمجيات (نحو 25 يورو)، وهوائي 1090 MHz مضبوط في المصنع (50 إلى 70 يورو)، وبضعة أمتار من الكابل المحوري، وحاسوب محمول أو Raspberry Pi يشغل أحد المفكّكات المجانية (dump1090 وسلالته هي المعيار). يستغرق التثبيت بعد ظهر يوم، وتعرض البرمجيات، خلال دقائق، جدولاً بالطائرات مع عناوين الإيكاو ورموز النداء والمواقع والارتفاعات والسرعات، وخريطة. وكل شيء في المشروع استقبال فقط؛ لا شيء يُرسل، وينبغي أن يفهم الفصل أن الإرسال على ترددات الطيران سيكون غير قانوني وخطيراً ممّا. ويحتاج الوصول إلى السطح إلى موافقة المدرسة المعتادة؛ ونافذة في طابق علوي تواجه تدفّقات الحركة الرئيسية بداية جيدة تمامًا. وتشرح صفحة «كن مغدّيًا» في هذا الموقع التثبيت نفسه خطوة خطوة وتتيح لمستقبل المدرسة تغذية الخريطة المباشرة.

التحقيق الأول هو الأفق الراديوي. يبلغ المفكك، لكل طائرة، عن المسافة والارتفاع اللذين سمعت عندهما آخر مرة. على مدى يوم، اجمع المدى الأقصى الذي استقبلت عنده الطائرات في عدة نطاقات ارتفاع وارسم المدى بدلالة الارتفاع. لدى الطلاب المعادلة من الدرس 4 وارتفاع الهوائي؛ وينبغي أن يتنبؤوا بالمنحنى قبل أن يروا البيانات، ثم يقارنوا. والتوافق جيد عادة للطائرات العالية وأسوأ

للمنخفضة، ومناقشة السبب (المباني، والتضاريس، وثقب الهوائي فوق الرأس، وحجب الطائرة لنفسها) هي نوع المواجهة بين النظرية والقياس الذي لا يستطيع كتاب مدرسي تقديمه. وخريطة أبعد طائرة شُمعت في كل اتجاه، التي ترسمها البرمجيات، تُظهر تضاريس المنطقة كلها كظلال في التغطية.

والثاني هو الهوائي. قارن معدلات الرسائل والمدى الأقصى والهوائي في الداخل، وعند نافذة، وعلى السطح؛ رأسياً ومستلقياً أفقياً؛ قائماً على سطح معدني ومبعداً عن أي معدن. تختبر كل مقارنة ادعاءً محدداً من الدرسين 1 و5، وينبغي التنبؤ بكل نتيجة أولاً. واختبار الاستقطاب هو الأكثر إثارة: مستلقياً، يفقد الهوائي معظم طائراته.

والثالث هو البيانات. سجّل يوماً كاملاً من الحركة واطرح عليه أسئلة: الساعة الأكثر ازدحاماً، وتوزيع ارتفاعات الطيران الاعتيادي (يتوقع الطلاب انتشاراً ويجدون معظم طائرات الركاب بين 10,000 و12,000 m)، ومعدل صعود المغادرات من أقرب مطار، والدول التي تمرّ طائراتها أكثر من غيرها (من تخصيص عناوين الإيكاو). وتستطيع المجموعة الأكبر فكّ ترميز الرسائل الخام بأنفسهم، من السلاسل الست عشرية التي تسجلها البرمجيات، والتحقّق من CRC في شفرتهم الخاصة. ويستطيع فصل لديه مستقبل ثانٍ في مدرسة شريكة على بعد 30 كيلومتراً أو أكثر، كلاهما بمخرجات مختومة زمنياً بـ GNSS، محاولة تحديد ثنائي الأبعاد متعدد المواقع لطائرة يسمعهما كلاهما ومقارنته بالموقع الذي بثته الطائرة: أطمح ناتج للدورة، وحقيقي.

اختتم بالأسئلة التي يطرحها النظام ولا يجيب عنها. الرسائل غير موقّعة، فيستطيع مرسل بثّ طائرة شبح؛ ما الذي يدافع عن النظام، وكم ستكلّف نسخة موقّعة؟ وتعتمد الطائرة على أقمار اصطناعية يمكن التشويش عليها؛ ماذا يحدث لصورة المراقب عندما يُشوّش عليها؟ والبيانات تحدّد هوية الطائرات، والطائرة يمكن أن تحدّد هوية شخص؛ من ينبغي أن يستطيع تتبّع من؟ والفصل الذي بنى المستقبل قد استحقّ هذه الأسئلة، وهي تصلح مقالاً ختامياً أو مناظرة جيدة.

## إجابات تحديات الطالب

تطرح صفحة الطالب ثمانية تحديات، واحداً أو اثنين لكل درس، يمكن استخدامها واجباً منزلياً أو اختباراً لنهاية الدورة. والإجابات، مع التعليق الذي ينبغي أن يحتويه إجابة كاملة العلامة:

1. الطول الموجي عند 1090 MHz:  $\lambda = c / f = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275 \text{ m}$ . العنصر ربع الموجي: 6.9 cm. التعليق:  $c = f \times \lambda$ ، وسرعة الضوء الثابتة تفرض علاقة عكسية.
2. الضوء أسرع من الصوت بـ  $3.00 \times 10^8 / 343$ ، أي نحو 875,000 مرة. على مدى 30 km تستغرق الرسالة 100 ميكروثانية والصوت 87 s؛ والطائرة بسرعة 250 m/s تتحرّك 22 km في ذلك الوقت.
3. خطأ ساعة بميكروثانيتين يعطي خطأ مدى قدره  $600 \text{ m} = 3 \times 10^8 \times 10^{-6}$ . يلزم أربعة أقمار اصطناعية لأن إزاحة ساعة المستقبل مجهول رابع إلى جانب x و y و z.
4.  $24^2 = 16,777,216$  عنواً. رسالة من 112 بتاً بمعدل بت واحد في الميكروثانية تدوم 112 ميكروثانية، و120 مع المقدّمة.
5. في 8D 8D4840D6...، هي 10001101: البتات الخمسة الأولى 10001 تساوي 17، ف  $DF = 17$ ، رسالة ADS-B من مرسل مستجيب Mode S؛ والثلاثة التالية، 101، تعطي  $CA = 5$ . و4840D6 هو عنوان الإيكاو.
6. الأفق الراديوي من هوائي بارتفاع 15 m إلى طائرة على ارتفاع 9,000 km:  $4.12 \times (3.87 + 94.9) = 407 \text{ km}$ . لطائرة على ارتفاع 300 km:  $4.12 \times (3.87 + 17.3) = 87 \text{ km}$ .
7. مضاعفة المسافة تقسم القدرة المستقبلية على أربعة، لأن القدرة المرشلة نفسها تنتشر على كرة بأربعة أمثال المساحة. فقد المسار عند 200 km و1090 dB:  $20 \times 2.30 + 60.7 + 32.4 = 139 \text{ dB}$ ، أقل بـ 6 dB مما عند 400 km، بما يتّسق مع عامل أربعة.

8. الهوائي المستلقي أفقيًا متعامد الاستقطاب مع الموجة المستقطبة رأسياً ولا يستقبل إلا القليل جداً؛ فالتيار المحثوث يعتمد على مركبة المجال الكهربائي على امتداد الموصل. والمستقبل في الطابق الأرضي يفقد مدى لأن مسافة أفقه،  $4.12 \times \sqrt{h1}$ ، تتقلص، ولأن المباني تحجب خط البصر.

التالي

## المشروع، خطوة خطوة

افترض مشروع الدرس 6 وجود مستقبل؛ والورشة العملية تبنيه. وهي مكتوبة لمن لم يستخدم Raspberry Pi قط: قائمة المشتريات بالأسعار، والهوائي الذي يُختار، وموضعه وفقد الكابل، وتحضير الـ Pi، والأوامر الثلاثة التي تثبت مغذي Dataero، وطلب ملكية المحطة، وضبط الكسب، وخمسة قياسات، واحد لكل درس، تختبر الفيزياء على السماء. ومحطة تغذي Dataero تعطي الفصل لوحة تحكم وخريطة تغطية وعاماً من السجل للعمل عليها.

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