

ما هو ADS-B وكيف يعمل

اثنا عشر فصلًا. لا تفترض الدورة أي معرفة مسبقة بالطيران أو الراديو؛ ورياضيات المرحلة الثانوية تكفي للأمثلة المحولة، ويمكن تخطيطها من دون أن يضيع الخيط. زمن القراءة نحو 50 دقيقة.

تعلّم - <https://radar.dataero.eu/ar/learning/course> - 2026-10-22

المحتويات

الفصل 1 المشكلة: سماء مليئة بطائرات لا يراها أحد	الفصل 8 - فيزياء الهوائيات: التقاط موجة طولها 27 سنتيمترًا
الفصل 2 قبل ADS-B: العثور على الطائرات بالرادار	الفصل 9 الاستقبال وفك الترميز
الفصل 3 الفكرة: دع الطائرة تخبرنا	الفصل 10 من مستقبل واحد إلى خريطة قارة
الفصل 4 كيف تعرف الطائرة مكانها	الفصل 11 فيم يُستخدم، وأين يقصّر
الفصل 5 تشريح رسالة	الفصل 12 تاريخ موجز
الفصل 6 - فيزياء الموجة: الراديو بوصفه ضوءًا خفيًا	مسرد المصطلحات
الفصل 7 - فيزياء المدى: انحناء الأرض وخفوت الإشارة	التالي: من النظرية إلى التطبيق: ابن المستقبل

الفصل 1

المشكلة: سماء مليئة بطائرات لا يراها أحد

في يوم عمل عادي، تعبر نحو 30,000 رحلة المجال الجوي الأوروبي. تتحرك طائرة الركاب في طيرانها الاعتيادي بسرعة 250 مترًا في الثانية تقريبًا، أي 900 km/h؛ وطائرتان متقابلتان تقتربان من بعضهما بمقدار نصف كيلومتر كل ثانية. والطيار الذي ينظر من النافذة لا يرى من هذا شيئًا تقريبًا: على ارتفاع 10,000 متر، تبدو الطائرات الأخرى نقاطًا صغيرة، والسحب تخفي معظمها على أي حال. فالسماء شبكة طرق ثلاثية الأبعاد لا طرق مرسومة عليها، والحركة فيها سريعة وخفية في آن واحد.

توجد مراقبة الحركة الجوية لإبقاء تلك الحركة متباعدة. والقواعد بسيطة من حيث المبدأ: في المجال الجوي الخاضع للمراقبة، تبقى الطائرات متباعدة رأسيًا بما لا يقل عن 1,000 قدم (نحو 300 متر)، أو بمسافة أفقية محدّدة، هي عادة 5 أميال بحرية (9.3 km) قرب تغطية الرادار وأكثر من ذلك بكثير فوق المحيطات. ولتطبيق القواعد، يحتاج المراقب الجوي إلى أن يعرف، باستمرار وبموثوقية، موقع كل طائرة في قطاعه: لا أين كانت قبل دقيقة، بل أين هي الآن، وما ارتفاعها، وإلى أين تتجه. وموضوع هذه الدورة كله هو كيف تُكتسب تلك المعرفة. والكلمة التقنية لذلك هي **المراقبة**.

رقم يجدر تذكّره

بسرعة 900 km/h، تقطع الطائرة 15 km في الدقيقة و250 m في الثانية. وأي طريقة مراقبة تُحدّث ببطء، أو بخطأ كبير، تترك المراقب يخفّن على مدى المسافات التي تهّم بالضبط.

الفصل 2

قبل ADS-B: العثور على الطائرات بالرادار

كان الجواب الأول، الذي طُوّر في أواخر الثلاثينيات ونضج خلال الحرب العالمية الثانية، هو **الرادار الأولي**. يرسل هوائي دوار كبير نبضة قصيرة وقوية جدًا من الطاقة الراديوية. وعندما تصطم النبضة بطائرة، ينعكس جزء ضئيل منها. يقيس الرادار الزمن بين خروج النبضة وعودة الصدى؛ ولأن الراديو ينتقل بسرعة الضوء، $300,000 \text{ km/s}$ ، فإن الزمن يعطي المسافة. والاتجاه الذي كان الهوائي يشير إليه يعطي الزاوية. والرادار الأولي مستقل على نحو رائع: فالطائرة لا تحتاج إلى أي معدّات على الإطلاق، ولهذا لا يزال الجيش يستخدمه. لكن له نقاط ضعف حقيقية. فالصدى من طائرة بعيدة خافت إلى حدّ استثنائي، لذا يجب أن يكون المرسل ضخماً. والصدى لا يقول شيئاً عن هوية الطائرة أو ارتفاعها. ويستغرق الهوائي عدة ثوانٍ لإتمام دورة واحدة، لذا لا تُرى كل طائرة إلا مرة كل 4 إلى 12 ثانية، تكون خلالها قد تحرّكت ما يصل إلى 3 km.

أما الجواب الثاني، **رادار المراقبة الثانوي (SSR)**، فقد حوّل الطائرة إلى مشارك. ترسل محطة أرضية سؤالاً، *استجواباً*، على التردد 1030 MHz. ويسمع جهاز راديو صغير على متن الطائرة، **المرسل المُستجيب** (الترانسبوندر)، السؤال ويجب على التردد 1090 MHz بإشارة قوية من عنده. ولأن الرّد يُرسل بدلاً من أن يُعكّس، فهو أقوى من صدى الرادار بملايين المرات، ولأنه يُؤلّد بحاسوب، فيمكنه أن يحمل معلومات. في أقدم صيغة (Mode A) يحتوي الرّد على رمز هوية من أربعة أرقام يعيّن المراقب؛ وفي Mode C يحتوي أيضاً على ارتفاع الطائرة. وفي الثمانينيات جاء **Mode S** (حرف S من «selective» أي انتقائي)، حيث يملك كل مرسل مستجيب عنواناً فريداً من 24 بتاً، ويمكن استجوابه على حدة، ويمكنه الرّد برسائل بيانات من 56 أو 112 بتاً. احتفظ بهذا الرقم، 1090 MHz، وبهذا المصطلح، Mode S، في ذهني: ف ADS-B مبني مباشرة على كليهما.

كان الرادار الثانوي تحسّيناً كبيراً، لكنه لا يزال يشترك مع سلفه في حدّين. فالطائرة لا تتكلّم إلا عندما تُسأل، لذا لا تزال الأرض تحتاج إلى محطة استجواب ضمن المدى، وهذا يستبعد المحيطات والصحارى وسلاسل الجبال. ولا تزال المحطة تحتاج إلى هوائي دوار لتعرف من أي اتجاه جاء الرّد، لذا لا تزال كل طائرة تُرى مرة واحدة فقط في كل دورة، ولا تزال شاشة المراقب تعرض نقطة تقفز كل بضع ثوانٍ بدلاً من طائرة تتحرّك بسلاسة. ولتحسين ذلك، كان لا بد من شيء مختلف جذرياً: طريقة تُبلّغ بها الطائرة عن موقعها من دون أن تُسأل، ومن دون أن تضطر الأرض إلى قياس أي شيء على الإطلاق.

الفصل 3

الفكرة: دع الطائرة تخبرنا

بحلول التسعينيات، نضجت تقنيتان جعلتا نهجاً مختلفاً ممكناً. فقد أعطت الملاحة بالأقمار الاصطناعية كل طائرة مجهزة تجهيزاً مناسباً معرفة دقيقة بموقعها، أفضل بكثير مما يمكن لأي رادار أن يقيسه من الأرض. وكان المرسل المستجيب Mode S يوفّر أصلاً جهاز راديو يستطيع إرسال رسائل بيانات على 1090 MHz. اجتمع الاثنين معاً فيصبح المنطق لا يُقاوم: بدلاً من أن تكافح الأرض لقياس مكان الطائرة، دع الطائرة، التي تعرف مكانها أصلاً، تقوله ببساطة، على فترات منتظمة، للجميع. هذا هو ADS-B، والكلمات الأربع في اسمه وصف دقيق له.

فهو **تلقائي (Automatic)**: لا شيء يُطلق الإرسال. يرسل المرسل المستجيب وفق جدولته الخاص، نحو مرتين في الثانية، سواء أكانت هناك محطة أرضية ضمن المدى أم لا، وسواء أفعّل الطيّار شيئاً أم لا؛ بل إن الطيّار لا يستطيع إيقافه أثناء الطيران إلا بإطفاء المرسل المستجيب، وهذا ممنوع. وهو **تابع (Dependent)**: كل عنصر في الرسالة يأتي من معدّات الطائرة نفسها، الموقع من مستقبلها للأقمار الاصطناعية والارتفاع من مقياس ارتفاعها الضغطي، والأرض لا تقيس شيئاً؛ بل تثق بما يُقال لها. وهو **مراقبة (Surveillance)**: غرضه أن يعرف الآخرون مكان الطائرة، لمراقبة الحركة الجوية وللطائرات القريبة، بخلاف الملاحة، التي هي معرفة الطائرة لمكانها بنفسها، وبخلاف الاتصالات، التي هي التحدّث إلى الطيّار. وهو **بث (Broadcast)**: ليس للرسالة مرسل إليه، ولا إقرار بالاستلام، ولا تشفير، وكل من يملك مستقبلًا ضمن المدى يسمع الشيء نفسه تمامًا، سواء أكان مركز مراقبة، أم طائرة ركاب أخرى، أم مدرسة.

«تابع» هي الكلمة التي تقلق المهندسين، والكلمة التي يستحق شرحها أكثر من غيرها. فالرادار يجري قياسًا مستقلًا: إن كانت أجهزة الطائرة خاطئة، فالرادار لا يبالي. أما ADS-B فيرت كل خطأ في نظام الملاحة الخاص بالطائرة، وإن خُدع ذلك النظام أو تعطل، كان الموقع الموثق خاطئًا بالثقة نفسها. ولهذا تحمل كل رسالة ADS-B، إلى جانب الموقع، بيانًا بمقدار ثقة الطائرة بموقعها (فئتا السلامة والدقة اللتان نلتقيهما في الفصل 5)، ولهذا لم يُطفأ الرادار.

و«بث» هي الكلمة التي تجعل هذه الدورة ممكنة. فلأن الرسائل تُرسل من دون تشفير إلى الجميع، لا تسمعها مراقبة الحركة الجوية وحدها بل أي مستقبل مضبوط على 1090 MHz، بما في ذلك المستقبل الذي قد تضعه على سطح مدرسة. والخاصية نفسها هي مصدر الحدّ الرئيسي للنظام، الذي يناقشه الفصل 11: الرسالة التي يستطيع أي أحد قراءتها هي أيضًا رسالة يستطيع أي أحد تزويرها.

الفصل 4

كيف تعرف الطائرة مكانها

يقوم كل شيء في ADS-B على معرفة الطائرة لموقعها بنفسها، لذا فهذا الفصل عن الملاحة بالأقمار الاصطناعية. المصطلح العام هو GNSS، النظام العالمي للملاحة بالأقمار الاصطناعية؛ ونظام GPS الأمريكي هو الأشهر، ويعمل Galileo الأوروبي وGLONASS الروسي وBeiDou الصيني على المبدأ نفسه. كل نظام كوكبة من نحو 24 إلى 30 قمرًا اصطناعيًا تدور على ارتفاع 20,000 km تقريبًا، أعلى بكثير من الطائرة، ويحمل كل منها ساعة ذرية دقيقة إلى بضعة أجزاء من مليار من الثانية. ويبت كل قمر باستمرار إشارة راديوية تقول، في جوهرها: «أنا القمر الاصطناعي رقم N، وموقعي كذا وكذا، والوقت الذي أرسلت فيه هذه الإشارة هو بالضبط T».

يسمع المستقبل على الطائرة تلك الإشارة بعد قليل، لأن الراديو يستغرق وقتًا في الانتقال: بسرعة 300,000 km/s، تستغرق مسافة 20,000 km من القمر الاصطناعي نحو 67 جزءًا من الألف من الثانية. يقارن المستقبل الوقت المختوم في الرسالة بوقت وصولها. والفرق، مضرورًا في سرعة الضوء، هو المسافة إلى ذلك القمر. مسافة واحدة تضع المستقبل في مكان ما على سطح كرة حول ذلك القمر. وكرتان تتقاطعان في دائرة؛ وثلاث كرات في نقطتين، إحداهما عادة غير معقولة (في أعماق الأرض أو بعيدًا في الفضاء) فتُستبعد. إذًا تكفي ثلاثة أقمار اصطناعية، لو كان للمستقبل ساعة مثالية.

لكن ليس له ساعة مثالية. فالساعة الذرية تكلف عشرات الآلاف من البوروهات ولن تتسع لها الطائرة؛ وللمستقبل ساعة كوارتز رخيصة قد تخطئ بأكثر بكثير من دقة التوقيت المطلوبة. وهنا الجزء الأنيق. يعامل المستقبل خطأ ساعته بوصفه مجهولًا رابعًا، إلى جانب إحداثيات موقعه الثلاثة، ويستمع إلى قمر اصطناعي رابع. أربع معادلات، أربعة مجاهيل: يحلّ المستقبل لإيجاد موقعه، ويصحّح ساعته، نتيجةً جانبية، إلى بضع عشرات من النانوثواني. ولهذا يحتاج مستقبل الأقمار الاصطناعية إلى أربعة أقمار على الأقل في مجال رؤيته، ولهذا يكون كل مستقبل GNSS أيضًا، بالمناسبة، واحدًا من أدق الساعات في المبنى.

يستحق الأمر التوقف عند المقادير، لأنها تفسر لماذا الملاحة بالأقمار الاصطناعية هي في الحقيقة تمرين في ضبط الوقت والهندسة فيه مجرد تفصيل لاحق. يقطع الضوء 30 سنتيمترًا في النانوثانية و300 متر في الميكروثانية، فخطأ توقيت جزء من مليون من الثانية يصبح خطأ موقع بمقدار 300 متر، ودقة الأمتار القليلة في مستقبل حديث تقابل توقيتًا عند مستوى نحو عشر نانوثواني. خذ حالة ملموسة. يختم قمر اصطناعي إشارة بالوقت 12:00:00.000000000؛ ويسمعها مستقبل الطائرة عند 12:00:00.070000000. زمن الانتقال 0.070 s، فالمسافة هي $0.070 \times 300,000 \text{ km/s} = 21,000 \text{ km}$. ولو كانت ساعة المستقبل متقدمة بميكروثانية واحدة، لحسب 21,000.3 km، أي أبعد بـ300 متر، ولتسلّل الخطأ نفسه إلى مسافة كل قمر اصطناعي آخر أيضًا. وهذا الخطأ المشترك هو بالضبط ما يكشفه القمر الرابع ويزيله.

ارتفاعان، لا ارتفاع واحد

تعطي الأقمار الاصطناعية ارتفاعًا فوق السطح الرياضي للأرض، أي ارتفاعًا هندسيًا. لكن الارتفاع الذي تبته الطائرة لأغراض الحركة الجوية ليس هذا. إنه الارتفاع البارومتري، المشتق من ضغط الهواء خارج الطائرة، المقيس عبر فتحة صغيرة في جسمها تُسمى فتحة الضغط الساكن. ينخفض ضغط الهواء مع الارتفاع بطريقة معروفة (نحو 1 hPa لكل 8 أمتار قرب الأرض، وأبطأ في الأعلى)، وكل

مقياس ارتفاع في العالم يحوّل الضغط إلى ارتفاع باستخدام الغلاف الجوي القياسي نفسه، المرجعي إلى 1013.25 hPa عند مستوى سطح البحر. وفي يوم يكون فيه الضغط غير معتاد، يكون الارتفاع البارومتري لكل طائرة خاطئاً بالمقدار نفسه، وهذا هو المقصود بالضبط: فما يهمّ للفصل بين الطائرات ليس الارتفاع الحقيقي فوق البحر، بل أن طائرتين تقرأن كلتاهما «مستوى الطيران 350» تبعدان حقاً 300 متر عن طائرة تقرأ «مستوى الطيران 340». يبتّ ADS-B الارتفاع البارومتري في رسائل الموقع، بخطوات من 25 قدمًا (7.6 m)، ويبتّ على حدة الفرق بينه وبين ارتفاع الأقمار الاصطناعية، لكي يستطيع المستقبل استعادة الاثنين.

الفصل 5

تشرح رسالة

رسالة ADS-B التي تستخدمها طائرات الركاب في العالم كله هي إرسال Mode S يُسمّى **السكويتر الممدّد** (extended squitter)؛ و«سكويتر» كلمة قديمة من عامية الرادار تعني إرسالاً يُبتّ تلقائياً لا رداً على استجواب، و«ممدّد» لأنه بطول 112 بتاً، أي ضعف طول ردّ Mode S الأصلي. ويكتب المهندسون «1090ES» اختصاراً لـ «1090 extended squitter MHz». يدوم كل إرسال 120 ميكروثانية في المجموع: مقدّمة من 8 ميكروثوانٍ، وهي نمط ثابت من أربع نبضات يتيح للمستقبل التعرّف على بداية الرسالة ومزامنة ساعته، تليها 112 بتاً من البيانات بمعدل بت واحد في الميكروثانية.

كيف يُرسل البت: تضمين موضع النبضة

تُقسم كل فتحة بت مدّتها ميكروثانية واحدة إلى نصفين. نبضة من الطاقة الراديوية في النصف الأول وصمت في الثاني تعني 1؛ وصمت ثم نبضة تعني 0. فهناك إذاً نبضة واحدة بالضبط لكل بت، أيّاً كانت البيانات، وما على المستقبل إلا أن يقرّر أي نصفي كل فتحة كان أعلى. هذا المخطط، تضمين موضع النبضة، متين في مواجهة أنواع الضوضاء والخفوت التي تتعرّض لها الإشارة في طريقها من مرسل مستجيب إلى هوائي بعيد، وفكّ ترميزه رخيص.

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



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

البتات الـ 112

DF	CA	عنوان الإيكاو	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 فحص الأخطاء (CRC)

البتات الخمسة الأولى، صيغة الوصلة الهابطة، تقول أي نوع من رسائل Mode S هذه؛ والقيمة 17 تعني «ADS-B من مرسل مستجيب Mode S». و**عنوان الإيكاو** المكوّن من 24 بتاً هو هوية الطائرة الدائمة، تُعيّن لها عند تسجيلها: هناك 2 أس 24، أي 16,777,216 عنواناً ممكناً، تُخصّص على شكل كتل للدول من قبل الإيكاو، هيئة الطيران المدني التابعة للأمم المتحدة. فالطائرات البلجيكية، مثلاً، تحمل عناوين من 448000 إلى 44FFFF بالنظام الست عشري. وبخلاف الرمز الرباعي في Mode A القديم، لا يتغيّر هذا العنوان أبداً ولا يُشارك أبداً، فيستطيع المستقبل أن يتأكّد من هوية الطائرة التي يسمعها منذ الرسالة الأولى.

حقل **ME** المكوّن من 56 بتًا هو المحتوى الفعلي، وبتاته الخمسة الأولى، رمز النوع، تقول ما يعنيه الباقي. رموز النوع من 1 إلى 4 تحمل رمز نداء الطائرة، مثل BEL1234 أو RYR7KL، على شكل ثمانية محارف من ستة بتات. والرموز من 9 إلى 18 تحمل موقعًا جويًا مع الارتفاع البارومتري؛ ومن 20 إلى 22 الشيء نفسه مع ارتفاع الأقمار الاصطناعية. والرمز 19 يحمل السرعة: السرعة الأرضية مفكّكة إلى مركبتين شرق-غرب وشمال-جنوب، والمعدل الرأسي، والفرق بين الارتفاع البارومتري وارتفاع الأقمار الاصطناعية. والرموز 28 و29 و31 تحمل الحالة: رموز الطوارئ، والارتفاع المختار، وفئتا السلامة والدقة اللتان تقولان إلى أي مدى يمكن الوثوق بالموقع المبتوث (فقيمة «NIC» تساوي 8، مثلًا، تُعد بأن الموقع الحقيقي يقع ضمن 185 m من الموقع المبلّغ، باحتمال عالٍ).

البتات الـ 24 الأخيرة هي **فحص التكرار الدوري**، وهو عدد يُحسب من البتات الـ 88 السابقة بقسمة ثابتة على كثيرة حدود. يعيد المستقبل الحساب على البتات التي فكّ ترميزها؛ فإن لم تتطابق النتيجة، كان بت واحد على الأقل قد تلف في الطريق فتُهمل الرسالة. ولأن نبضة مدّتها ميكروثانية واحدة يمكن أن تضيع بسهولة بسبب الضوضاء أو رسالة متداخلة من طائرة أخرى، فإن هذا الفحص هو ما يُبقي المواقع المشوّهة بعيدًا عن شاشة المراقب. وتبدو رسالة حقيقية، كما يسجلها المستقبل، هكذا:

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: صيغة الوصلة الهابطة 17، القدرة 5. 4840D6: عنوان الإيكافو، طائرة هولندية. 20...: رمز النوع 4، رسالة تعريف، يُفكّ ترميزها إلى رمز النداء KLM1023. 576098: فحص الأخطاء.

حشر الأرض في 34 بتًا

لا تحتوي رسالة الموقع إلا على 17 بتًا لخط العرض و17 لخط الطول. وهذا يعني 131,072 خطوة حول الكرة الأرضية كلها، نحو 300 m لكل خطوة عند خط الاستواء: ليس جيدًا بما يكفي على الإطلاق. يحلّ ADS-B ذلك **بالإبلاغ المضغوط عن الموقع**. تُقسم الأرض إلى مناطق؛ وتعطي البتات الـ 17 موقعًا دقيقًا جدًا (إلى نحو 5 m) داخل المنطقة، لكن ليس أي منطقة. وتتناوب الطائرة بين شبكتي مناطق مختلفتين قليلًا، رسائل «زوجية» و«فردية»، والمستقبل الذي سمع واحدة من كل نوع يستطيع تحديد المنطقة من دون لبس. وما إن يفعل، تكفي رسالة واحدة لتتبع الطائرة، إذ لا يُعقل أن تكون قد قفزت إلى منطقة أخرى في نصف ثانية. إنها حيلة بارعة تضاعف الدقة المفيدة من دون أي كلفة في البتات.

كم مرة

يرسل المرسل المستجيب أثناء الطيران رسالة موقع مرتين في الثانية، ورسالة سرعة مرتين في الثانية، ورمز ندائه كل خمس ثوانٍ، إضافة إلى رسائل حالة على فترات أطول، أي نحو أربعة إلى خمسة سكويترات ممدّدة في الثانية في المجموع. يدوم كل منها 120 ميكروثانية؛ فالمرسل المستجيب يرسل ADS-B فعليًا أقل بكثير من جزء من ألف من الوقت. وفي بقية الثانية يستمع إلى استجابات الرادار على 1030 MHz واستفسارات تجنّب التصادم من الطائرات الأخرى، ويردّ عليها.

الفصل 6 - فيزياء

الموجة: الراديو بوصفه ضوءًا خفيًا

تغادر الرسالة الطائرة على شكل **موجة راديوية**، والفكرة الأكثر فائدة في هذه الدورة كلها هي أن الموجة الراديوية وشعاع الضوء شيء واحد. فكلهما موجة كهرومغناطيسية: نمط من المجالات الكهربائية والمغناطيسية يتذبذب معًا وينتقل عبر الفضاء بسرعة الضوء، c ، وهي 299,792,458 مترًا في الثانية، أو 300,000 km/s تقريبًا. وما يميّز الموجة الراديوية عن الضوء الأخضر، أو عن الأشعة السينية في المستشفى، أو عن الموجات الدقيقة في فرن المطبخ، هو فقط مدى سرعة تذبذب المجالات: **التردد**، f ، المقيس بالهرتز (عدد التذبذبات في الثانية).

ولأن الموجة تنتقل بسرعة ثابتة، فإن التردد يحدّد المسافة بين قمة والقمة التالية، أي **الطول الموجي**، λ . في ثانية واحدة تقطع الموجة c مترًا وتتم f تذبذبًا، فيشغل كل تذبذب c / f مترًا:

$$c = f \times \lambda$$

أي cm ، الموجة بين الطائرة وهوائيها تتباعد قممها 27.5 m. $\lambda = 300,000,000 / 1,090,000,000 = 0.275$ m. ADS-B: بالنسبة إلى نحو طول مسطرة مدرسية.

الموجة	التردد	الطول الموجي	ملاحظة
إذاعة FM	100 MHz	3 m	هوائيات السيارات جزء من هذا
ADS-B / Mode S	1,090 MHz	27.5 cm	يُستخدم أيضًا لردود المرسل المستجيب على الرادار
الهاتف المحمول (نطاق 4G)	1,800 MHz	17 cm	جار قريب في الطيف
Wi-Fi، فرن الميكروويف	2,450 MHz	12 cm	التردد نفسه، وقدرة مختلفة اختلافًا هائلًا
الضوء الأخضر المرئي	560,000,000 MHz	0.00054 mm	أعلى ترددًا بنصف مليون مرة

نتيجتان مهمتان لكل ما يلي. أولاً، لأن الموجة ضوء، فهي تنتقل في خطوط مستقيمة ما لم يحنها شيء أو يحجبها، ولا تخترق الأرض. وهذا يحدّد مدى النظام، موضوع الفصل 7. ثانيًا، لأن طولها الموجي 27.5 cm، فإن البنى المعدنية التي تتفاعل معها بأقوى شكل، الهوائيات، تكون من هذا الحجم تقريبًا، موضوع الفصل 8.

لماذا الراديو ليس صوتًا

الخلط الأكثر شيوعًا، عند الكبار بقدر الأطفال، هو بين الراديو والصوت، ربما لأن «الراديو» صندوق يُصدر صوتًا. وهما ظاهرتان لا علاقة بينهما. فالصوت موجة ضغط في الهواء، سلسلة من الجزيئات يدفع بعضها بعضًا؛ يحتاج إلى مادة ينتقل عبرها، ويتحرّك بسرعة 340 m/s، ولا يستطيع عبور الفراغ. أما الراديو فلا يحتاج إلى شيء: يعبر الفراغ بين القمر الاصطناعي والطائرة، ويتحرّك أسرع بنحو مليون مرة. يغادر ضجيج محرك الطائرة ورسالة ADS-B الطائرة في اللحظة نفسها؛ تصل الرسالة إلى مستقبل على بعد 20 km في 67 ميكروثانية، ويصل الصوت بعد دقيقة كاملة.

لماذا 1090 MHz

التردد إرث. فقد خُصّصت اتفاقيات دولية في الخمسينيات النطاق من 960 إلى 1215 MHz للملاحة الراديوية للطيران، وصار 1090 MHz تردد ردّ المرسلات المستجيبة لرادار المراقبة الثانوي. وعندما صُمّم ADS-B، كانت إعادة استخدام المرسل المستجيب المركّب أصلًا في كل طائرة ركاب أرخص بكثير من تركيب جهاز راديو جديد، فصار ADS-B ببساطة شيئًا آخر يقوله المرسل المستجيب Mode S على 1090 MHz. وفي الولايات المتحدة، يجوز للطائرات الأصغر التي تطير تحت نحو $5,500$ m أن تستخدم نظامًا ثانيًا بدلًا منه، هو UAT على 978 MHz، ولهذا تستمع المستقبيلات هناك غالبًا على الترددتين.

الفصل 7 - فيزياء

المدى: انحناء الأرض وخفوت الإشارة

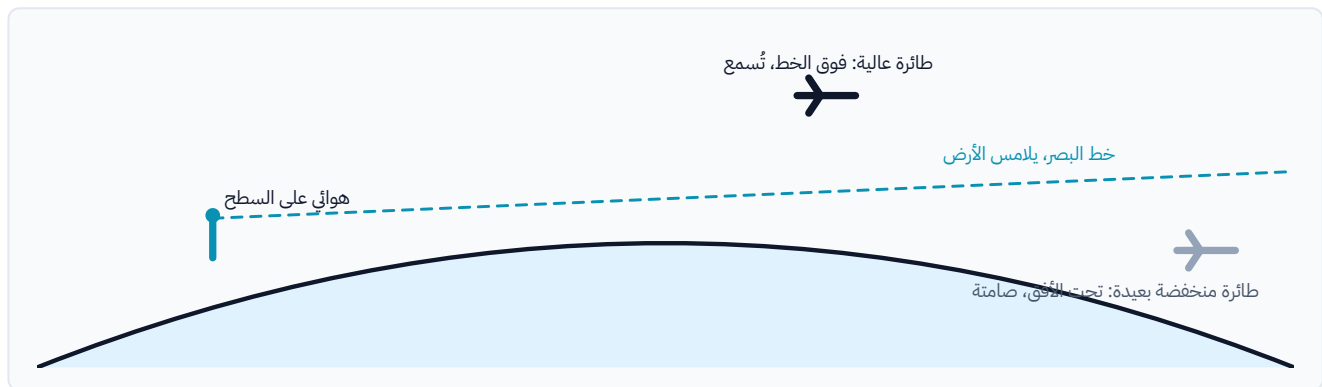
يرسل المرسل المستجيب بقدرة ذروة تبلغ بضع مئات من الواط. فإلى أي بعد يمكن سماع إشارة كهذه؟ يحدّها أمران مختلفان تمامًا، ويجدر الفصل بينهما: الهندسة، التي تضع حدًا قاطعًا، والقدرة، التي تضع حدًا لئبًا.

الأفق الراديوي

عند 1090 MHz، يسلك الراديو سلوك الضوء: ينتقل في خطوط مستقيمة ولا ينحني حول الأرض. لذلك لا يستطيع هوائي أرضي سماع طائرة إلا ما دام بينهما خط مستقيم لا يمرّ عبر الأرض. وبالنسبة إلى راصد على السطح، الأفق هو حيث يلامس ذلك الخط الأرض بالكاد. وكلما ارتفعت الطائرة، ابتعدت نقطة الملامسة تلك؛ وكلما ارتفع الهوائي، ابتعدت أكثر. وتعطي هندسة المماس للكرة نتيجة بسيطة: المسافة إلى الأفق بالكيلومترات تساوي نحو 3.57 مضروبًا في الجذر التربيعي للارتفاع بالأمتر. ويحني الغلاف الجوي الراديو قليلًا نحو الأسفل، فيمدد الأفق بنحو 15 بالمئة، لذا يستخدم المهندسون 4.12 بدلًا منه:

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h_{\text{الطائرة}}} + \sqrt{h_{\text{الهوائي}}})$$

الارتفاعات بالأمتر: $4.12 \times (104.9 + 4.5) = 451 \text{ km}$. m: 1,000 طائرة على ارتفاع 20 m، وهوائي على سطح بارتفاع 11,000 m، والسطح، m: 1,000 طائرة على ارتفاع 15 km. ما لم تكن الأرض بينهما مستوية وخالية: km: طائرة على الأرض على بعد 15 km. نفسه: 4.12 x (31.6 + 4.5) = 149 km.



يفسر هذا الشكل المميز لتغطية المستقبل: دائرة بقطر 400 km أو أكثر للحركة العالية، تنكمش إلى بضعة عشرات من الكيلومترات للطائرات في مرحلة الاقتراب، وتكاد تنعدم للطائرات على الأرض إلا في المطار المجاور. ويفسر أيضًا لماذا يهم ارتفاع المستقبل أكثر بكثير من جودته، ولماذا يستطيع تلّ، أو مبنى عالٍ، أو حتى جناح الطائرة نفسها عندما تميل بعيدًا عنك، أن يقطع الإشارة في الحال.

قانون التربيع العكسي

داخل الأفق، تضعف الإشارة مع المسافة. يُشعّ هوائي المرسل المستجيب في كل الاتجاهات الأفقية، فتنتشر قدرته على سطح كرة تكبر باستمرار. وتزداد مساحة الكرة بمربع نصف قطرها، فتتخفض القدرة الساقطة على هوائي ذي حجم ثابت بمربع المسافة: ضعف المسافة، ربع القدرة؛ عشرة أضعاف المسافة، جزء من مئة. يعبر المهندسون عن ذلك بفقد *المسار* بالديسيبل، ويبلغ عند 1090 MHz على مدى 400 km نحو 145 dB، أي أن القدرة المستقبلية أصغر من القدرة المرسلّة بنحو 10 أس 14.5 مرة. فنبضة بقدرة 250 واط تصل بنحو عُشر جزء من مليار من الملي واط. ويستطيع مستقبل جيد اكتشاف ذلك، بالكاد، ولهذا يتصادف أن الأفق الهندسي وحدّ القدرة يتطابقان عند بضعة مئات من الكيلومترات: فقد صُمم النظام هكذا.

يتفاعل الحدّان بطريقة تستحق الفهم. داخل الأفق، تُفكّ إشارة قوية من طائرة قريبة وإشارة ضعيفة من طائرة بعيدة كلتاهما بشكل تام، لأن مخطط موضع النبضة في الفصل 5 لا يسأل إلا أي نصفي كل فتحة بت كان أعلى، لا كم كان عاليًا. فالإشارة لا تخفت تدريجيًا خارج نطاق الفائدة مع ابتعاد الطائرة؛ بل تبقى قابلة لفكّ الترميز حتى يقطعها، في مكان ما قرب الأفق، إمّا الهندسة وإمّا ضوضاء المستقبل التي تغمرها أخيرًا، فيتوقّف المسار. ولهذا تكون لخرائط التغطية حواف حادّة، ولهذا تكون أبعد الطائرات التي يسمعيها المستقبل هي الأعلى دائمًا تقريبًا.

الفصل 8 - فيزياء

الهوائيات: التقاط موجة طولها 27 سنتيمترًا

الهوائي قطعة من موصل مشكّلة بحيث تجعل الموجة الكهرومغناطيسية المارة الإلكترونيات فيه تتحرك بتناغم، فتننتج تيارًا متناوبًا ضئيلاً يستطيع المستقبل تضخيمه. ويحدث العكس في المرسل: تيار متناوب في هوائي الطائرة يُطلق الموجة. وتعتمد كفاءة هذا التبادل على حجم الموصل نسبةً إلى الطول الموجي. يستجيب السلك المستقيم بأقوى شكل، أي يرنّ، عندما يكون طوله نصف طول موجي، بحيث يتطابق التيار المتأرجح ذهابًا وإيابًا على طوله مع تذبذب الموجة تمامًا، كأرجوحة طفل تُدفع بإيقاعها الطبيعي. وعند 1090 MHz، نصف الطول الموجي هو 13.75 cm.

الشكل العملي الأكثر شيوعًا هو **الهوائي أحادي القطب ربع الموجي**: قضيب رأسي طوله ربع طول موجي، 6.9 cm، قائم على سطح موصل، هو **المستوى الأرضي**. يعمل المستوى الأرضي كمرآة، فيسلك القضيب وانعكاسه معًا سلوك هوائي نصف موجي. ولهذا يكون هوائي ADS-B على الطائرة نصلاً قصيرًا بارتفاع بضعة سنتيمترات على جسمها، إذ يكون الجسم هو المستوى الأرضي، ولهذا يكون هوائي الهاوي سلكًا قصيرًا على غطاء علب معدنية. والسلك ذو الطول الخاطئ يعمل أيضًا، لكن أسوأ بكثير: ف«الأذن المعدنية» مضبوطة.

تنتج ثلاث خصائص أخرى للهوائي من الفيزياء، ولكل منها نتيجة مرئية. الأولى **الاستقطاب**. يتذبذب المجال الكهربائي للموجة الكهرومغناطيسية في اتجاه محدد عمودي على اتجاه انتقالها، ولا يستجيب الهوائي إلا لمركبة المجال على امتداد طوله. تُركّب هوائيات الطائرات رأسيًا، فتصل موجة ADS-B مستقطبة رأسيًا، ويجب أن يكون هوائي الاستقبال رأسيًا أيضًا؛ وإذا وُضع على جانبه فلا يكاد يسمع شيئًا، كما تُوقّف موجة حبل يُهزّ لأعلى ولأسفل بشقّ أفقي. الثانية **نمط الإشعاع**. الهوائي الرأسي أكثر حساسية نحو الأفق وعديم الحساسية على امتداد محوره، فتأخذ حساسيته في الأبعاد الثلاثة شكل كعكة حلقيه والهوائي يمرّ عبر ثقبها. لذلك تسمع المستقبّلات بانتظام طائرات على بعد 300 km من دون صعوبة وتفقد طائرة تمرّ فوقها مباشرة لبضع ثوانٍ، وهو أمر يستحق المراقبة على أي خريطة مباشرة. ورصّ عدة عناصر رنانة فوق بعضها يضغط الكعكة لتصير أكثر تسطّحًا، فيركّز الحساسية نحو الأفق، حيث الطائرات البعيدة، على حساب ما فوق الرأس؛ وهذا هو المقصود **بكسب الهوائي**، وهو دائمًا إعادة توزيع للحساسية، لا خلق لها أبدًا.

والثالثة تتعلّق بما يقع بين الهوائي والمستقبل. يلتقط الهوائي لا 1090 MHz وحده بل كل إشارة في الجوار، بما فيها إرسالات الهاتف المحمول على بعد بضع مئات من الميغاهرتز وهي أقوى بكثير، لذا يوضع أولًا مرشّح لا يمرّر إلا نطاق الطيران. ثم على الإشارة أن تسافر عبر كابل، وعند 1090 MHz يفقد الكابل المحوري نحو نصف الإشارة كل عشرة أمتار؛ والعلاج مضخم منخفض الضوضاء عند الهوائي، قبل الكابل، لتكون الإشارة قوية بما يكفي لتنجو من الرحلة، لا عند المستقبل، حيث يضخم التضخيم ضوضاء الكابل مع ما تبقى من الإشارة. هذه تفاصيل، لكنها التفاصيل التي تقرّر ما إذا كان المستقبل على سطح مدرسة يسمع الطائرات عند الأفق أم القرية فقط.

الفصل 9

الاستقبال وفك الترميز

بين الهوائي والنقطة على الخريطة سلسلة من خمس مراحل. يحوّل الهوائي الموجة المارة إلى تيار متناوب من بضعة ميكروفولتات. ويحتفظ مرشّح ومضخم منخفض الضوضاء بنطاق 1090 MHz، ويرفضان كل شيء آخر، ويرفعان الإشارة ألف مرة. ويضبط راديو معرّف بالبرمجيات التردد ويعاين الإشارة مليوني مرة في الثانية، محوّلًا إياها إلى سيل من الأرقام. ويبحث مفكّك الترميز في ذلك السيل عن نمط المقدّمة، ويقرأ البتات الـ 12، ويتحقّق من التكافؤ ويفكّ ترميز الحقول. ويجمع متعقّب الرسائل من كل طائرة في سجل واحد يُحدّث باستمرار: موقع، ومسار، وتسمية.

المرحلة اللاحقة هي الثالثة. حتى نحو عام 2010، كان فكّ ترميز 1090 MHz يحتاج إلى عتاد مخصّص يكلف آلاف اليوروهات. ثم اكتشف الهواة أن موالف تلفاز USB بسعر 20 يورو يحتوي على شريحة يمكن أن يُطلب منها الضبط على أي تردد وتسليم الإشارة الخام إلى حاسوب. يحوّل هذا الراديو المعرّف بالبرمجيات مشكلة الراديو إلى مشكلة برمجة: يستقبل حاسوب محمول أو Raspberry Pi سيلاً من مليوني رقم في الثانية يصف شدّة الإشارة، وتبحث برمجيات مجانية عن نمط المقدّمة، وتقاس أي نصفي كل فتحة ميكروثانية أعلى، وتجمّع 112 بتاً، وتحسب CRC، وتطبع الحقول. ومشروع المستقبل في حقبة المرحلة الثانوية هو هذه السلسلة بالضبط، وتستطيع مدرسة بناءه بأقل من 100 يورو.

مرحلة المتعقّب هي حيث يتحوّل سيل الرسائل إلى معرفة. فرسالة الموقع الواحدة، تذكّر، ملتبسة حتى تُقرّن رسالة زوجية برسالة فردية. وتصل السرعة منفصلة عن الموقع، ورمز النداء منفصلاً أيضاً، ويخطط المتعقّب هذه معاً بعنوان الإيكادو، ويُهمّل كل ما يخفق في فحص الأخطاء، ويحتفظ بآخر حالة معروفة لكل طائرة. وإن لم تصل رسالة لمدة دقيقة، عادة لأن الطائرة هبطت تحت الأفق، ينتهي المسار.

الفصل 10

من مستقبل واحد إلى خريطة قارة

يسمع المستقبل الواحد دائرة من السماء قطرها بضع مئات من الكيلومترات. وتحتاج خريطة أوروبا إلى مئات منها، والمفيدة منها ليست في المدن بل متفرقة: على السواحل، وفي الوديان، وعلى الجزر، حيثما لا تصل دائرة مستقبل آخر. يرسل كل مستقبل رسائله المفكوكة، مختومة كل منها بوقت وصولها، عبر الإنترنت إلى خدمة مركزية. وهذه الخدمة تجعّج: فالرسالة نفسها من طائرة عالية تصل عادة من عشرة أو عشرين مستقبلاً في آن واحد، ويجب التعرّف على التكرارات ودمجها. وهي تتحقّق أيضاً: فالموقع الذي يخالف رؤية كل المستقبلات المجاورة للطائرة نفسها هو على الأرجح خطأ في فكّ الترميز أو مرسل مستجيب معطوب، فيُعلّم أو يُهمّل.

التحديد متعدّد المواقع: العثور على طائرات لا تقول أين هي

لا تبتّ كل طائرة موقعها. فالمرسلات المستجيبة الأقدم تردّ على الرادار بالهوية والارتفاع لكن لا مدخل لها من الأقمار الاصطناعية؛ وبعض الطائرات لا ترسل موقعاً عمداً. ومع ذلك لا تزال إرسالاتها على 1090 MHz تصل إلى الأرض، وتستطيع شبكة تحديد موقعها بقلب الملاحة بالأقمار الاصطناعية رأساً على عقب. فإذا سجّل أربعة مستقبلات ذات ساعات متزامنة بدقة لحظة وصول الإرسال نفسه إلى كل منها، كشفت الفروق بين تلك اللحظات الفروق في المسافة: فالرسالة التي وصلت إلى المستقبل A قبل المستقبل B بميكروثانية واحدة أرسلت من نقطة أقرب إلى A منها إلى B بمقدار 300 m. وكل النقاط التي لها هذه الخاصية تقع على سطح منحني، هو سطح زائدي، بين A وB. وثلاثة سطوح كهذه، من أربعة مستقبلات، تتقاطع عند الطائرة. هذا هو التحديد متعدّد المواقع (multilateration)، ويتطلّب توقيتاً بدقة نحو عُشر ميكروثانية، أي 30 m، عبر مستقبلات تتباعد مئات الكيلومترات، وتحصل عليه المستقبلات من الأقمار الاصطناعية نفسها التي تستخدمها الطائرة.

الفكرة نفسها، مرتين

الملاحة بالأقمار الاصطناعية: مستقبل واحد، وأربعة مرسلات مواقعها معروفة، فحلّ لإيجاد المستقبل. التحديد متعدّد المواقع: مرسل واحد، وأربعة مستقبلات مواقعها معروفة، فحلّ لإيجاد المرسل. وفي كليهما، ما يُقاس فعلاً هو الزمن، والميكروثانية الواحدة تساوي 300 متر.

الفصل 11

فيم يُستخدم، وأين يقصّر

مراقبة الحركة الجوية هي الزبون الأول. ففي أنحاء أوروبا، يرى المراقبون الآن صورة مدمجة يُجمع فيها ADS-B، بتحديثاته مرتين في الثانية ودقته بمستوى الأقمار الاصطناعية، مع الرادار والتحديد متعدّد المواقع؛ وحيث لم يصل الرادار قط، فوق شمال الأطلسي والقطب الشمالي والصحراء الكبرى ومعظم المحيطات، تلتقط رسائل ADS-B مستقبلات محمولة على أقمار اتصالات اصطناعية في مدارات منخفضة، وهو ما أتاح للطائرات العابرة للأطلسي أن تتباعد بمسافات أقرب بكثير من ذي قبل. والطائرات هي الزبون الثاني: فطائرة الركاب المزوّدة بـ«ADS-B In» تعرض الحركة القريبة لطاقتها وتغذّي بها نظام تجنّب التصادم. وتستخدمه المطارات لتتبع الطائرات والمركبات على الأرض في الضباب. ويستخدم الباحثون البيانات المفتوحة لدراسة الضجيج واستهلاك الوقود وخطوط التكاليف والتأخيرات. والمستقبل على سطح مدرسة مشارك، بشكل صغير، في كل هذا.

تنبع نقاط ضعف النظام مباشرة من تصميمه، وكل منها يستحق الفهم لا مجرد التعداد. فلأن الرسائل تُبث من دون تشفير، لا مشفرة ولا موقّعة، لا يوجد في الرسالة نفسها ما يثبت أنها جاءت من طائرة. ويستطيع مرسل على الأرض، بشكل غير قانوني، بث رسالة متقنة الصياغة تصف طائرة لا وجود لها، وسيفكّ المستقبل ترميزها من دون اعتراض. وما يحمي النظام ليس الرسالة بل السياق من حولها: فالشبح لن يظهر على الرادار، ولن يعثر عليه التحديد متعدّد المواقع، ولن يسلك سلوك الحركة الحقيقية، ومراكز المراقبة تجري مقارنات متقاطعة باستمرار. ونوقشت لسنوات طويلة نسخة من البروتوكول بتوقيعات تشفيرية؛ والعقبة عملية أكثر منها تقنية، إذ سيتعيّن تغيير كل مرسل مستجيب في العالم.

ولأن الموقع تابع لمستقبل الأقمار الاصطناعية في الطائرة، فإن كل ما يشوّش على الملاحة بالأقمار الاصطناعية يشوّش على ADS-B. وقد صار التشويش والانتحال لإشارات الأقمار الاصطناعية شائعين قرب مناطق النزاع، وقد تعجز طائرة تعبر منطقة كهذه عن حساب موقع، أو قد تحسب موقعًا خاطئًا. فتحمل رسائلها عندئذ فئة سلامة متدنية، ويعلمها نظام المراقب، ويتولّى الرادار، القياس المستقل الذي لم يُقصد قط أن يحلّ ADS-B محلّه كليًا، زمام الأمور. فالعلاقة بين الاثنين إذاً ليست علاقة خلف بسلف بل علاقة شريكين لهما نقاط ضعف متكاملة.

ولأن الإلزام يشمل طائرات الركاب ومعظم الطائرات الأكبر لكن ليس كل ما يطير، فالخريطة ناقصة بحكم التصميم. فقد لا تحمل الطائرات الخفيفة خارج المجال الجوي الخاضع للمراقبة، والطائرات الشراعية، والمناطيد، وكثير من الطائرات العسكرية أي ADS-B على الإطلاق، وتستخدم بعض الطائرات الخفيفة أنظمة أخرى لا يسمعها مستقبل 1090 MHz. ولأن البث يحدّد هوية الطائرة، فيمكنه تحديد هوية مالكيها: فتتبع طائرة خاصة بعينها هو، فعليًا، تتبّع شخص بعينه، وقد أدّى ذلك إلى برامج تحجب تسجيل الطائرات التي يطلب مالكوها ذلك، وإلى جدل مستمر حول ما إذا كانت معلومات تبثّها طائرة إلى العالم يمكن أن تكون خاصة أيضًا. وهذا الجدل جيد لطرحه على الطلاب الأكبر سنًا، لأن الفيزياء لا تقدّم له جوابًا.

الفصل 12

تاريخ موجز

من 1935 إلى 1945

تطوير الرادار الأولي في بريطانيا وألمانيا والولايات المتحدة؛ وبحلول نهاية الحرب، تردّ مرسلات مستجيبة لـ«تمييز الصديق من العدو» على نبضات الرادار برّد مرّمز، وهي سلف الرادار الثانوي.

الخمسينيات والستينيات

توحيد معايير الرادار الثانوي المدني: استجابات على 1030 MHz، وردود على 1090 MHz، ورموز هوية Mode A، وارتفاع Mode C.

الثمانينيات

تطوير Mode S، بعناوين فريدة من 24 بتًا ورسائل بيانات، في مختبر لينكولن بمعهد MIT واعتماده من الإيكاء. ويصبح GPS عاملاً للمستخدمين المدنيين.

من التسعينيات إلى العقد الأول من الألفية

تعريف ADS-B وتجربته، لا سيما في ألاسكا، حيث كانت تغطية الرادار مستحيلة والحوادث متكررة. ويُوخِّد السكويتر الممدد على 1090 MHz دوليًا.

العقد الثاني من الألفية

تجعل أجهزة الراديو المعزفة بالبرمجيات الرخيصة الاستقبال هوائية؛ وتظهر شبكات تطوُّعية من آلاف المستقبلات. وتُطلق مستقبلات على أقمار اصطناعية لتغطية المحيطات.

2020

يصبح ADS-B إلزاميًا لمعظم الطائرات في المجال الجوي الخاضع للمراقبة في الولايات المتحدة (يناير) والاتحاد الأوروبي (يونيو، مع فترة انتقالية حتى نهاية العام). وتبدأ السماء بالكلام، في كل مكان، طوال الوقت.

مسرد المصطلحات

ADS-B

المراقبة التابعة للتلقائية - البث (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast). الطائرات تبث موقعها بنفسها.

التحديد متعدد المواقع

تحديد موقع مرسل من فروق أزمنة وصول الإشارة إلى عدة مستقبلات (multilateration).

الارتفاع البارومتري

الارتفاع المشتق من ضغط الهواء، باستخدام غلاف جوي قياسي؛ وهو ما تبَّلع عنه الطائرات.

فقد المسار

ضعف الإشارة مع المسافة، وفق قانون التربيع العكسي.

الأفق الراديوي

أبعد مسافة يبقى عندها الخط المستقيم بين الهوائي والطائرة فوق سطح الأرض.

CPR

الإبلاغ المضغوط عن الموقع، مخطط الزوجي/الفردية الذي يحشر موقعًا دقيقًا في 34 بتًا.

SDR

الراديو المعزف بالبرمجيات: موالف يسلم عيّنات الإشارة الخام إلى حاسوب لفك الترميز.

SSR

رادار المراقبة الثانوي: الأرض تستجوب، والمرسل المستجيب يرد.

المُرسل المُستجيب

جهاز الراديو في الطائرة الذي يرد على الرادار ويرسل ADS-B على 1090 MHz (الترانسبوندر).

الطول الموجي

المسافة بين قمتين متتاليتين في الموجة: c/f ، أي 27.5 cm عند 1090 MHz.

CRC

فحص التكرار الدوري، فحص الأخطاء من 24 بتًا الذي تنتهي به كل رسالة.

السكويتر الممدد

إرسال Mode S التلقائي من 112 بتًا الذي يحمل ADS-B.

GNSS

النظام العالمي للملاحة بالأقمار الاصطناعية: GPS و Galileo و BeiDou و GLONASS.

عنوان الإيكاء

الهوية الدائمة من 24 بتًا للمرسل المستجيب في الطائرة.

Mode S

معيّار الرادار الثانوي الانتقائي الذي بُني عليه ADS-B.

التالي

من النظرية إلى التطبيق: ابن المستقبل

شرح اثنا عشر فصلاً نظامًا تستطيع الآن أن تمسكه بيدك. وتحولها الورشة العملية إلى عمل بعد ظهر واحد: ماذا تشتري بـ 100 إلى 150 يورو، وكيف تبني الهوائي وتضعه، وكيف تحضر Raspberry Pi وتثبت مغذي Dataero، وكيف تشاهد الطائرات التي تسمعها تظهر على الخريطة المباشرة منسوبة إلى محطتك. ولكل فصل أعلاه قياس ينتظره هناك: الأفق الراديوي على طائرات حقيقية، وقانون التربيع العكسي في عمود الإشارة، والإيقاع اليومي للسماء.

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