อายุ 12 ถึง 18 ปี - สำหรับครู

ถอดรหัสท้องฟ้า: ฟิสิกส์และคอมพิวเตอร์ผ่านระบบจริงหนึ่งระบบ

ห้าบทเรียนและหนึ่งโครงงาน แต่ละบทเรียนหยิบ ADS-B ขึ้นมาหนึ่งส่วน แล้วพัฒนาฟิสิกส์หรือวิทยาการคอมพิวเตอร์ที่อยู่เบื้องหลังอย่างครบถ้วน ได้แก่ การพิสูจน์สูตรในจุดที่ชั้นเรียนตามได้ ตัวอย่างการคำนวณด้วยตัวเลขจริง การสาธิตที่ทำให้แนวคิดสังเกตได้ และจุดที่สัญชาตญาณของนักเรียนมักผิดพลาด นักเรียนกลุ่มอายุน้อย (12 ถึง 14 ปี) ติดตามแนวคิดและการคำนวณ ส่วนกลุ่มอายุมาก (15 ถึง 18 ปี) ติดตามการพิสูจน์สูตรและดำเนินโครงงาน

เรียนรู้ - https://radar.dataero.eu/th/learning/ages-12-18 2026-11-21

สารบัญ

ก่อนเริ่ม: ทำไมระบบจริงหนึ่งระบบจึงคุ้มค่ากับห้าบทเรียน

บทเรียนที่ 1 - ฟิสิกส์ คลื่นและสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า: สิ่งที่พาข้อความเดินทาง

บทเรียนที่ 2 - ฟิสิกส์และคณิตศาสตร์ เวลาและตำแหน่ง: เครื่องบินรู้ได้อย่างไรว่าตัวเองอยู่ที่ไหน และเครือข่ายหาเครื่องบินที่ไม่ยอมบอกได้อย่างไร

บทเรียนที่ 3 - วิทยาการคอมพิวเตอร์ ข้อความดิจิทัล: 112 บิตส่งอย่างไร และจับข้อผิดพลาดอย่างไร

บทเรียนที่ 4 - ฟิสิกส์ การแพร่กระจายและระยะรับ: ความโค้งของโลกและกฎกำลังสองผกผัน

บทเรียนที่ 5 - ฟิสิกส์และวิศวกรรม เสาอากาศและเครื่องรับ: จากคลื่นยาว 27 เซนติเมตร สู่จุดบนแผนที่

โครงงาน - สองถึงสี่สัปดาห์ สร้างเครื่องรับและทดสอบฟิสิกส์กับท้องฟ้าจริง

เฉลยโจทย์ท้าทายของนักเรียน

ต่อไป โครงงาน ทีละขั้นตอน

ก่อนเริ่ม: ทำไมระบบจริงหนึ่งระบบจึงคุ้มค่ากับห้าบทเรียน

ฟิสิกส์ส่วนใหญ่ที่สอนในช่วงอายุ 12 ถึง 18 ปีถูกสอนเป็นชิ้น ๆ หน่วยการเรียนรู้เรื่องคลื่นที่หนึ่ง เรื่องสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าอีกที่หนึ่ง หัวข้อข้อมูลดิจิทัลในวิชาคอมพิวเตอร์ และการกล่าวถึงดาวเทียมในวิชาภูมิศาสตร์ ADS-B เป็นระบบที่ทำงานจริงเพียงระบบเดียว ซึ่งทุกชิ้นส่วนเหล่านั้นล้วนมีบทบาทสำคัญพร้อมกัน และชั้นเรียนสามารถสังเกตผลลัพธ์ได้ด้วยเครื่องรับที่ราคาถูกกว่าหนังสือเรียนหนึ่งเล่ม เครื่องบินหาตำแหน่งของตัวเองโดยจับเวลาสัญญาณวิทยุจากดาวเทียม ซึ่งก็คือการหาตำแหน่งด้วยระยะทาง (trilateration) และความเร็วแสง มันเข้ารหัสผลลัพธ์ลงใน 112 บิต พร้อมการตรวจสอบความซ้ำซ้อนแบบวน (cyclic redundancy check) ซึ่งก็คือการเข้ารหัสฐานสองและการตรวจจับข้อผิดพลาด มันส่งบิตเหล่านั้นออกไปเป็นคลื่นวิทยุที่มอดูเลตตำแหน่งพัลส์ที่ 1090 MHz ซึ่งก็คือสเปกตรัม ความถี่ และความยาวคลื่น คลื่นจะไปถึงเครื่องรับได้เฉพาะตามเส้นตรงที่พ้นความโค้งของโลก และมาถึงด้วยความแรงที่ลดลงตามกำลังสองผกผันของระยะทาง ซึ่งก็คือเรขาคณิตและพลังงาน เสาอากาศที่ปรับจูนแล้วยาวหนึ่งในสี่ความยาวคลื่นแปลงคลื่นเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งก็คือการสั่นพ้อง และเครือข่ายเครื่องรับสามารถหาตำแหน่งได้แม้แต่เครื่องส่งที่ไม่บอกตำแหน่ง จากผลต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง ซึ่งก็คือโจทย์ดาวเทียมที่กลับด้าน แต่ละบทเรียนด้านล่างหยิบเรื่องหนึ่งในนี้มาพัฒนาอย่างเต็มที่ในตัวเอง โดยใช้ ADS-B เป็นตัวอย่างที่ดำเนินไปตลอด ไม่ใช่แค่ของตกแต่ง

หลักสูตรอ้างอิงในหน้าแรกนำเสนอระบบทั้งหมดในรูปแบบเรื่องเล่า และชั้นเรียนควรอ่านบทที่ 3 และ 5 ของหลักสูตรนั้นก่อนบทเรียนที่ 3 และบทที่ 6 ถึง 8 ก่อนบทเรียนที่ 4 และ 5 อภิธานศัพท์ของหลักสูตรนั้นเป็นเอกสารแจกที่มีประโยชน์ หน้านี้ถือว่าท่านได้อ่านหลักสูตรนั้นแล้ว และเน้นที่ฟิสิกส์และการสอน ข้อตกลงด้านตัวเลขใช้อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้า ได้แก่ c = 3.00 x 10^8 m/s, f = 1090 MHz ความสูงเป็นเมตร ระยะทางเป็นกิโลเมตร และเครื่องบินที่บินระดับเดินทางถือว่าอยู่ที่ 11 000 m (ระดับการบิน 360) และ 250 m/s เว้นแต่ตัวอย่างจะระบุเป็นอย่างอื่น

มีคำเตือนสองข้อเกี่ยวกับสัญชาตญาณ นักเรียนมักเข้ามาพร้อมความเชื่อว่าคลื่นวิทยุเป็นเสียงชนิดหนึ่ง และว่า "เรดาร์" หรือ "ดาวเทียม" เป็นผู้มองเห็นเครื่องบิน ทั้งสองความเชื่อผิด ทั้งสองข้อได้รับการจัดการอย่างชัดเจนในบทเรียนที่ 1 และ 2 และทั้งสองจะกลับมาอีก หลักสูตรนี้ออกแบบให้บทเรียนถัด ๆ ไปแต่ละบทให้เหตุผลใหม่แก่ท่านในการแก้ไขความเชื่อเหล่านี้ และนักเรียนที่คล่องกับสูตรมักไม่คล่องกับขนาดของปริมาณ หลักสูตรนี้จึงเน้นการถามว่า "นั่นใหญ่แค่ไหน" ในทุกขั้นตอน เพราะ 300 m ต่อไมโครวินาที การสูญเสียตามเส้นทาง 145 dB และที่อยู่ 2^24 ค่า คือตัวเลขประเภทที่ทำให้ฟิสิกส์รู้สึกเป็นของจริง

บทเรียนที่ 1 - ฟิสิกส์

คลื่นและสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า: สิ่งที่พาข้อความเดินทาง

เริ่มจากข้อสังเกตที่ทั้งหลักสูตรตั้งอยู่บนมัน ข้อความวิทยุของเครื่องบินกับลำแสงเป็นปรากฏการณ์ทางกายภาพเดียวกัน ทั้งสองเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สั่นและเคลื่อนที่ผ่านอวกาศโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางใด ๆ ด้วยความเร็ว c ที่เท่ากันทุกความถี่ในสุญญากาศ และเกือบเท่ากันในอากาศ คือ 299 792 458 m/s ซึ่งชั้นเรียนใช้เป็น 3.00 x 10^8 m/s ได้ ปริมาณที่ทำให้คลื่นวิทยุต่างจากแสงที่มองเห็นได้ และแสงที่มองเห็นได้ต่างจากรังสีเอกซ์ มีเพียงความถี่ f ของการสั่นเท่านั้น จอตาของเราตอบสนองต่อความถี่ระหว่างประมาณ 4 x 10^14 ถึง 8 x 10^14 Hz ซึ่งเรารับรู้เป็นสีแดงไปจนถึงสีม่วง ส่วน ADS-B ส่งที่ 1.09 x 10^9 Hz ต่ำกว่าประมาณห้าแสนเท่า ไม่มีอะไรในคลื่นที่ต่างกันโดยธรรมชาติ มีแต่ตาของเราที่เลือกรับ

ให้พิสูจน์สมการคลื่นร่วมกับชั้นเรียน แทนที่จะบอกสูตรไปเลย ถ้าคลื่นเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว c และสั่น f ครั้งต่อวินาที ในหนึ่งวินาทีมันจะเคลื่อนไปได้ระยะ c และสร้างรอบที่สมบูรณ์ f รอบ แต่ละรอบจึงยาว c / f ความยาวนั้นคือความยาวคลื่น lambda ดังนั้น c = f x lambda เมื่อใช้กับ ADS-B: lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m ข้อความระหว่างเครื่องบินกับเครื่องรับมียอดคลื่นห่างกัน 27.5 cm ให้ชั้นเรียนวางตำแหน่งนี้บนสเปกตรัมที่วาดเอง บนแกนลอการิทึม ได้แก่ วิทยุกระจายเสียง FM ที่ 100 MHz และ 3 m, ADS-B ที่ 1 090 MHz และ 27.5 cm, โทรศัพท์มือถือที่ 1 800 MHz และ 17 cm, Wi-Fi และเตาไมโครเวฟที่ 2 450 MHz และ 12 cm, อินฟราเรด, แสงที่มองเห็นได้ที่ 5.6 x 10^14 Hz และ 540 nm ไปจนถึงรังสีเอกซ์ แบบฝึกหัดการวางคลื่นของเครื่องบินไว้ระหว่างโทรศัพท์กับเตาอบมีค่ามากกว่าตารางใด ๆ เพราะมันทำให้เห็นว่าสิ่งเหล่านี้เป็นเพื่อนบ้านกัน

จากนั้นให้เผชิญกับความสับสนเรื่องเสียงโดยตรง เพราะเป็นความสับสนที่พบได้ทั่วไป และเพราะการเปรียบเทียบช่วยสอนปรากฏการณ์ทั้งสอง เสียงเป็นคลื่นความดันตามยาวในตัวกลาง ความเร็วของมันเป็นสมบัติของตัวกลาง คือ 343 m/s ในอากาศที่ 20 องศา ประมาณ 1 500 m/s ในน้ำ และเป็นศูนย์ในสุญญากาศ คลื่นวิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางเลย เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว c ในสุญญากาศ และช้ากว่านั้นเพียงเล็กน้อยจนสังเกตไม่ได้ในอากาศ ให้ใส่ตัวเลขให้กับช่องว่างนี้ 3.00 x 10^8 หารด้วย 343 ได้ประมาณ 875 000 เครื่องบินที่อยู่ห่างออกไป 30 km ซึ่งปล่อยเสียงและข้อความออกมาพร้อมกัน จะส่งข้อความถึงใน 100 ไมโครวินาที และเสียงถึงใน 87 วินาที เมื่อเสียงมาถึง เครื่องบินบินไปแล้ว 22 km การสาธิตคือเชือกในห้องเรียนและไฟฉายข้ามสนาม คลื่นในเชือกเห็นได้ชัดว่า

ต้องอาศัยเชือก และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เชือกกำหนด ส่วนแสงไฟฉายไปถึงปลายสนามโดยไม่มีความล่าช้าที่ใครจะวัดได้ ให้ระบุอย่างชัดเจนว่าเชือกมีอะไรเหมือนแสง (เป็นคลื่น มีความยาวคลื่น ความถี่ ความเร็วคงที่ และจึงมีความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่าง f กับ lambda) และอะไรที่ไม่เหมือน (ต้องมีตัวกลาง และมีความเร็วระดับเมตรต่อวินาที)

ปิดท้ายด้วยโพลาไรเซชัน ซึ่งสาธิตได้ด้วยต้นทุนต่ำและจะเป็นประโยชน์ในบทเรียนที่ 5 สนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสั่นในทิศทางที่แน่นอน ตั้งฉากกับทิศที่คลื่นเคลื่อนที่ เสาอากาศทรานสปอนเดอร์ของเครื่องบินตั้งในแนวดิ่ง คลื่น ADS-B จึงมีโพลาไรเซชันแนวดิ่ง เสาอากาศรับก็ต้องตั้งในแนวดิ่งเช่นกัน และถ้าหมุนเป็นแนวนอนจะแทบไม่ได้ยินอะไรเลย คลื่นในเชือกที่สะบัดขึ้นลงจะผ่านช่องแนวดิ่งบนกล่องกระดาษได้ และถูกกั้นด้วยช่องแนวนอน ฟิล์มโพลาไรซ์สองแผ่น (จากแว่นสามมิติราคาถูกหนึ่งอัน) ที่วางไขว้กันหน้าหน้าต่างแสดงสิ่งเดียวกันกับแสง ให้ชั้นเรียนทำนายว่าการรับสัญญาณจะเป็นอย่างไรถ้าวางเสาอากาศรับนอนราบ แล้วนักเรียนจะได้ทดสอบคำทำนายนี้ในโครงงาน

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับมอบหมาย
ระบบ ADS-B ระบบที่สองซึ่งเครื่องบินเล็กในสหรัฐอเมริกาใช้ ส่งที่ 978 MHz ความยาวคลื่นของมันเป็นเท่าไร และเสาอากาศหนึ่งในสี่ความยาวคลื่นสำหรับระบบนี้จะยาวเท่าไร (0.307 m; 7.7 cm) นักเรียนที่ทำข้อนี้ได้ถือว่าผ่านบทเรียนที่ 1

บทเรียนที่ 2 - ฟิสิกส์และคณิตศาสตร์

เวลาและตำแหน่ง: เครื่องบินรู้ได้อย่างไรว่าตัวเองอยู่ที่ไหน และเครือข่ายหาเครื่องบินที่ไม่ยอมบอกได้อย่างไร

ทุกสิ่งที่เครื่องบินกระจายออกไปเกี่ยวกับตำแหน่งของมันมาจากระบบนำทางด้วยดาวเทียม และโดยพื้นฐานแล้วระบบนำทางด้วยดาวเทียมก็คือการวัดเวลา ดาวเทียม GNSS แต่ละดวงโคจรอยู่ที่ความสูงประมาณ 20 200 km มีนาฬิกาอะตอม และส่งสัญญาณบอกตำแหน่งของตัวเองและเวลาที่ส่งที่แน่นอน เครื่องรับจดเวลาที่สัญญาณมาถึง ผลต่างคูณด้วย c คือระยะทางถึงดาวเทียมดวงนั้น และระยะทางเพียงค่าเดียวนี้วางเครื่องรับไว้บนทรงกลมรัศมีนั้นที่มีดาวเทียมเป็นจุดศูนย์กลาง ให้ชั้นเรียนหาจำนวนเอง ทรงกลมสองลูกตัดกันเป็นวงกลม สามลูกตัดกันที่สองจุด ซึ่งจุดหนึ่งอยู่ไกลจากผิวโลกและตัดทิ้งได้ ดาวเทียมสามดวงจึงเพียงพอ หากเครื่องรับมีนาฬิกาที่สมบูรณ์แบบ แต่มันไม่มีเลย ออสซิลเลเตอร์ควอตซ์คลาดเคลื่อนมากกว่าระดับนาโนวินาทีที่ต้องการอยู่มาก ทางแก้ซึ่งเป็นหัวใจอันงดงามของเรื่องนี้ คือการถือว่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาเครื่องรับเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าตัวที่สี่ และใช้ดาวเทียมดวงที่สี่ ได้สี่สมการในสี่ตัวแปร (x, y, z และค่าชดเชยนาฬิกา) ที่แก้อย่างต่อเนื่อง เครื่องรับ GNSS จึงต้องมองเห็นดาวเทียมสี่ดวง และผลพลอยได้คือมันรักษาเวลาได้แม่นยำภายในหลายสิบนาโนวินาที ซึ่งเป็นเหตุผลที่เครื่องรับในเครือข่ายของบทเรียนที่ 5 ใช้ดาวเทียมชุดเดียวกับเครื่องบินในการตั้งนาฬิกา

เขียนขนาดของปริมาณไว้บนกระดาน และย้อนกลับมาที่มันเสมอ แสงเดินทาง 0.300 m ในหนึ่งนาโนวินาที และ 300 m ในหนึ่งไมโครวินาที ความคลาดเคลื่อนของเวลา 1 ไมโครวินาทีคือความคลาดเคลื่อนของระยะ 300 m ความแม่นยำระดับไม่กี่เมตรของเครื่องรับสมัยใหม่สอดคล้องกับการจับเวลาในระดับสิบนาโนวินาที เวลาเดินทางจากดาวเทียมที่อยู่ตรงศีรษะพอดีคือ 20 200 km / 3.00 x 10^5 km/s = 0.0673 s และจากดาวเทียมใกล้ขอบฟ้าประมาณ 0.086 s เครื่องรับจึงวัดผลต่างระดับไม่กี่มิลลิวินาที ด้วยความแม่นยำหนึ่งในร้อยล้านส่วนของค่านั้น ให้ถามชั้นเรียนว่าจะเกิดอะไรขึ้นถ้านาฬิกาของดาวเทียมดวงหนึ่งเดินเร็วไปหนึ่งไมโครวินาที นักเรียนควรเห็นว่าเครื่องรับทุกเครื่องที่ใช้ดาวเทียมดวงนั้นจะถูกดันไปประมาณ 300 m ตามแนวเส้นที่ชี้ไปหามัน และนี่คือเหตุผลที่นาฬิกาของดาวเทียมได้รับการแก้ไขจากภาคพื้นดินหลายครั้งต่อวัน

แยกความสูงสองค่าออกจากกัน เพราะข้อความบรรจุทั้งสองค่า และนักเรียนมักถามเสมอ ผลคำนวณจากดาวเทียมให้ความสูงเชิงเรขาคณิตเหนือทรงรีอ้างอิงของโลก แต่เครื่องบินกลับรายงานความสูงความกดอากาศ คือความดันสถิตภายนอกลำตัวเครื่องบินที่แปลงเป็นความสูงด้วยบรรยากาศมาตรฐานสากล (International Standard Atmosphere) ซึ่งสมมติว่าที่ระดับน้ำทะเลมีความดัน 1013.25 hPa อุณหภูมิ 15 องศา และอุณหภูมิลดลง 6.5 องศาต่อกิโลเมตร ในวันที่ความดันจริงต่างจากค่ามาตรฐาน ความสูงความกดอากาศของเครื่องบินทุกลำจะผิดไปเท่ากัน ซึ่งตรงกับสิ่งที่การแยกระยะต้องการพอดี เครื่องบินสองลำที่อ่านค่าระดับการบิน 350 และ 360 จะห่างกัน 1 000 ft เสมอ ไม่ว่าอากาศจะเป็นอย่างไร ข้อความตำแหน่งของ ADS-B บรรจุความสูงความกดอากาศเป็นขั้นละ 25 ฟุต ส่วนข้อความความเร็วบรรจุผลต่างระหว่างความสูงความกดอากาศกับความสูงเชิงเรขาคณิต เครื่องรับจึงได้ทั้งสองค่า สำหรับกลุ่มอายุมาก ความสัมพันธ์ของ ISA คือ p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255 เป็นแบบฝึกหัดตารางคำนวณที่ดี ให้กลับสูตรเพื่อหา h จาก p แล้วตรวจว่า 11 000 m สอดคล้องกับประมาณ 227 hPa หรือหนึ่งในห้าของความดันที่ระดับน้ำทะเล

จากนั้นให้กลับโจทย์ด้าน เครื่องบินบางลำส่งสัญญาณที่ 1090 MHz โดยไม่มีตำแหน่งจากดาวเทียม เช่น ทรานสปอนเดอร์รุ่นเก่าที่ตอบเรดาร์ด้วยรหัสประจำตัวและความสูงเท่านั้น หรือเครื่องบินที่ GNSS ถูกรบกวนสัญญาณ เครือข่ายเครื่องรับยังหาตำแหน่งของมันได้ สมมติว่าเครื่องรับสี่เครื่องที่นาฬิกาตรงกันบันทึกเวลาที่สัญญาณเดียวกันมาถึง เครื่องส่งเป็นสิ่งที่ไม่รู้ เครื่องรับเป็นสิ่งที่รู้ นี่คือโจทย์ GNSS ที่สลับบทบาทของสิ่งที่รู้กับสิ่งที่ไม่รู้ ข้อความที่ถึงเครื่องรับ A ก่อนเครื่องรับ B หนึ่งไมโครวินาที ถูกส่งมาจากจุดที่ใกล้ A มากกว่า B อยู่ 300 m และทางเดินของจุดเหล่านั้นคือไฮเพอร์โบลอยด์ที่มี A และ B เป็นโฟกัส เครื่องรับสี่เครื่องให้คู่ที่อิสระต่อกันสามคู่ ได้ไฮเพอร์โบลอยด์สามรูป ซึ่งจุดตัดคือเครื่องบิน นี่คือมัลติเลเทอเรชัน (multilateration) และต้องการให้นาฬิกาของเครื่องรับตรงกันภายในประมาณ 100 ns ซึ่งได้มาจากดาวเทียม สำหรับชั้นเรียน ให้ลดเหลือสองมิติด้วยแบบฝึกหัดในสนาม นักเรียนสามคนถือนาฬิกาจับเวลายืนที่จุดที่วัดตำแหน่งไว้แล้ว คนที่สี่ซ่อนอยู่ที่ไหนสักแห่งแล้วตบมือ ทั้งสามบันทึกเวลาหน่วงที่แก้ค่าเวลาตอบสนองแล้ว และชั้นเรียนวาดเส้นไฮเพอร์โบลา (หรือง่ายกว่านั้น ใช้ตำแหน่งทดลองบนภาพวาดตามมาตราส่วน) เพื่อหาคนตบมือ โดยใช้ 343 m/s จากนั้นถามว่าความแม่นยำของการจับเวลาต้องเป็นเท่าไรถึงจะทำแบบเดียวกันกับคลื่นวิทยุในระยะ 200 km ได้ แล้วให้นักเรียนรู้สึกถึงช่องว่างระหว่างนาฬิกาจับเวลากับนาฬิกาอะตอม

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับมอบหมาย

เครื่องรับสองเครื่องที่อยู่ห่างกัน 60 km บันทึกข้อความเดียวกันได้ห่างกัน 50 ไมโครวินาที เครื่องบินอยู่ใกล้เครื่องรับเครื่องแรกมากกว่าเท่าไร (15 km) ถ้านาฬิกาทั้งสองคลาดกัน 1 ไมโครวินาที จะทำให้คำตอบคลาดเคลื่อนเท่าไร (300 m) นักเรียนที่อธิบายได้ว่าทำไมคำตอบที่สองจึงไม่ขึ้นกับระยะทาง ถือว่าเข้าใจสิ่งที่มัลติเลเทอเรชันต้องการแล้ว

บทเรียนที่ 3 - วิทยาการคอมพิวเตอร์

ข้อความดิจิทัล: 112 บิต ส่งอย่างไร และจับข้อผิดพลาดอย่างไร

ทรานสปอนเดอร์ของเครื่องบินส่งข้อมูล ADS-B ในรูป Mode S extended squitter คือส่วนนำ (preamble) ยาว 8 ไมโครวินาที ตามด้วยบิตข้อมูล 112 บิต ด้วยอัตราหนึ่งบิตต่อไมโครวินาทีพอดี ให้เริ่มบทเรียนด้วยส่วนนำ เพราะมันตอบคำถามที่นักเรียนยังไม่ทันคิดจะถาม เครื่องรับรู้ได้อย่างไรว่าข้อความเริ่มแล้ว เมื่อช่องสัญญาณเต็มไปด้วยสัญญาณรบกวนและเครื่องบินลำอื่น ส่วนนำเป็นรูปแบบตายตัวของพัลส์สี่ลูกที่ 0, 1, 3.5 และ 4.5 ไมโครวินาที ตัวถอดรหัสค้นหารูปแบบนั้นอยู่ตลอดเวลา เมื่อพบก็จะรู้ทั้งว่ามีข้อความตามมา และรู้แน่ชัดว่าช่องของแต่ละบิตเริ่มเมื่อไร ทุกโปรโตคอลดิจิทัลที่นักเรียนเคยพบ ตั้งแต่ Wi-Fi ไปจนถึง QR code ก็มีสิ่งที่ทำหน้าที่เดียวกัน และนี่เป็นจังหวะที่ดีที่จะบอกนักเรียน

ต่อด้วยการมอดูเลต วิทยุทำได้แค่เปิดหรือปิด แล้วจะส่ง 1 หรือ 0 ได้อย่างไร ADS-B ใช้การมอดูเลตตำแหน่งพัลส์ (pulse position modulation) ช่องของแต่ละบิตยาวหนึ่งไมโครวินาที แบ่งเป็นสองครึ่ง พัลส์ในครึ่งแรกตามด้วยความเงียบหมายถึง 1 ความเงียบตามด้วยพัลส์หมายถึง 0 วาดบิตสักสองสามบิตเป็นพัลส์บนกระดาน แล้วให้ชั้นเรียนอ่าน จากนั้นถามว่าทำไมวิธีนี้จึงดีกว่าวิธีที่เห็นได้ชัดอย่าง "มีพัลส์คือ 1 ไม่มีพัลส์คือ 0" เหตุผลสองข้อจะปรากฏออกมาเมื่อชี้แนะเล็กน้อย แต่ละบิตมีพัลส์หนึ่งลูกเสมอ เครื่องรับจึงล็อกจังหวะเวลาไว้ได้แม้จะเจอเลข 0 ติดกันยาว และมันตัดสินแต่ละบิตด้วยการถามว่าครึ่งไหนดังกว่า แทนที่จะถามว่าพัลส์เกินระดับเกณฑ์สัมบูรณ์หรือไม่ ทำให้การถอดรหัสไม่ไวต่อความแรงของสัญญาณ เลข 0 ติดกันยาว ๆ ในวิธีง่าย ๆ นั้นจะแยกไม่ออกจากความเงียบ แต่ใน PPM มันคือจังหวะกลองที่สม่ำเสมอของพัลส์ในครึ่งหลัง

สี่บิตในการมอดูเลตตำแหน่งพัลส์: 1, 0, 1, 1



แต่ละช่องยาว 1 ไมโครวินาที พัลส์ในครึ่งแรก: 1 พัลส์ในครึ่งหลัง: 0

ต่อไปคือการจัดเรียง 112 บิต ซึ่งชั้นเรียนควรเขียนออกมาได้จากความจำเมื่อจบบทเรียน บิตที่ 1 ถึง 5 คือ downlink format ซึ่งเป็น 17 สำหรับ ADS-B จากทรานสปอนเดอร์ บิตที่ 6 ถึง 8 คือรหัสความสามารถ (capability) บิตที่ 9 ถึง 32 คือที่อยู่ ICAO ขนาด 24 บิต ซึ่งเป็นรหัสประจำตัวถาวรของเครื่องบิน บิตที่ 33 ถึง 88 คือช่องข้อความขนาด 56 บิต ห้าบิตแรกของช่องนี้คือ type code ซึ่งบอกว่าอีก 51 บิตที่เหลือบรรจุอะไร ข้อความระบุตัวตน (type code 1 ถึง 4) บรรจุนามเรียกขาน (call sign) แปดตัวอักษรเป็นตัวอักษร 6 บิตแปดตัว ตำแหน่งขณะบิน (9 ถึง 18) บรรจุความสูงความกดอากาศ 12 บิต แฟล็กที่บอกว่าเป็นเฟรมคู่หรือคี่ และละติจูดกับลองจิจูดที่เข้ารหัสแล้วอย่างละ 17 บิต ข้อความความเร็ว (19) บรรจุองค์ประกอบตะวันออก-ตะวันตกและเหนือ-ใต้ของความเร็วเทียบพื้น อัตราไต่หรือร่อน และผลต่างระหว่างความสูงความกดอากาศกับความสูงเชิงเรขาคณิต บิตที่ 89 ถึง 112 คือ parity ขนาด 24 บิต ให้นักเรียนคำนวณ ที่อยู่ 24 บิตให้เครื่องบินได้ 2^24 = 16 777 216 ลำ ตัวอักษร 6 บิตแปดตัวมีได้ตัวละ 64 สัญลักษณ์ เพียงพอสำหรับตัวอักษร ตัวเลข และช่องว่าง ความสูง 12 บิตเป็นขั้นละ 25 ฟุตครอบคลุม 102 400 ฟุต และละติจูด 17 บิต ถ้าใช้ตรง ๆ กับ 180 องศาจะละเอียดได้เพียง 1.4 km ซึ่งนำไปสู่คำถามที่การรายงานตำแหน่งแบบกะทัดรัด (compact position reporting) ตอบ อธิบาย CPR ในหนึ่งย่อหน้า 17 บิตบอกตำแหน่งภายในโซนได้แม่นยำถึงไม่กี่เมตร แต่ไม่ได้บอกว่าเป็นโซนไหน เครื่องบินส่งสลับกันระหว่างตารางโซนสองชุด คือชุดคู่และชุดคี่ และเครื่องรับที่ได้ครบทั้งสองแบบจะระบุโซนได้แน่นอน แล้วติดตามต่อได้จากข้อความเดียว นี่เป็นตัวอย่างที่ดีของการได้ความแม่นยำมากขึ้นจากบิตจำนวนเท่าเดิมโดยใช้เวลา

DF 5 บิต รูปแบบดาวน์ลิงก์	**CA** 3 บิต ความสามารถ	**ที่อยู่ ICAO** 24 บิต รหัสประจำตัวเครื่องบินที่ไม่ซ้ำกัน	**ME - ข้อมูลหลัก** 56 บิต ตำแหน่ง ความสูง ความเร็ว นามเรียกขาน หรือสถานะ ขึ้นอยู่กับ type code ใน 5 บิตแรก	**PI** 24 บิต การตรวจข้อผิดพลาด (CRC)

ให้ข้อความจริงแก่ชั้นเรียนแล้วให้นักเรียนผ่าดู สายอักขระเลขฐานสิบหก 8D4840D6202CC371C32CE0576098 มี 28 หลัก หรือ 112 บิต แปลงสองหลักแรก 8D เป็นเลขฐานสองได้ 10001 101: DF = 17, CA = 5 หกหลักถัดไป 4840D6 คือที่อยู่ ICAO ซึ่งตารางการจัดสรรกำหนดให้เนเธอร์แลนด์ หลักถัดไป 20 ... ขึ้นต้นด้วย 00100 คือ type code 4 ข้อความระบุตัวตน และเมื่อถอดรหัสตัวอักษร 6 บิตที่ตามมาจะได้นามเรียกขาน KLM1023 หกหลักสุดท้าย 576098 คือ parity ชั้นเรียนที่มีโปรแกรมตารางคำนวณหรือ Python ไม่กี่บรรทัดถอดรหัสได้ทั้งหมดภายในหนึ่งคาบ และความสามารถในการมองสายอักขระเลขฐานสิบหกแล้วพูดได้ว่า "นั่นคือเครื่องบินของ KLM ที่กำลังประกาศหมายเลขเที่ยวบิน" คือผลลัพธ์ที่ควรมุ่งไปให้ถึง

> `8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098`
>
> 8D: downlink format 17, capability 5. 4840D6: ที่อยู่ ICAO จัดสรรให้เนเธอร์แลนด์. 20...: type code 4 การระบุตัวตน นามเรียกขาน KLM1023. 576098: parity ขนาด 24 บิต

ปิดท้ายด้วย parity เพราะเป็นแนวคิดทางคอมพิวเตอร์ที่ควรพัฒนาให้ลึกที่สุด เหนือสนามบินที่พลุกพล่าน ข้อความจากเครื่องบินหลายลำซ้อนทับกันที่เครื่องรับอยู่ตลอดเวลา และพัลส์บางลูกก็หายไปในสัญญาณรบกวน ตัวถอดรหัสจึงต้องประกอบบิตผิดออกมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ช่อง 24 บิตท้ายสุดคือการตรวจสอบความซ้ำซ้อนแบบวน (cyclic redundancy check) บิตข้อความ 88 บิตถูกมองเป็นเลขฐานสองยาว ๆ แล้วนำไปหาร ในเลขคณิตพิเศษที่การลบคือ exclusive-or ด้วยตัวสร้างขนาด 25 บิตที่กำหนดไว้ เศษที่เหลือคือ CRC เครื่องรับหารซ้ำกับบิตที่ตัวเองถอดรหัสได้แล้วเปรียบเทียบ บิตที่เสียหายเพียงบิตเดียว สองบิต หรือข้อผิดพลาดติดกันเป็นช่วงยาวไม่เกิน 24 บิต จะทำให้เศษเปลี่ยนไป ข้อความที่เสียหายจึงถูกปฏิเสธ สาธิตแนวคิดนี้ในขนาดเล็กด้วย CRC แบบ 4 บิตกับข้อความ 8 บิตที่ทำด้วยมือหรือด้วยสิ่งที่คล้ายกันแต่ง่ายกว่า คือเลขตรวจสอบบนบาร์โค้ด จากนั้นให้กลุ่มอายุมากเขียน CRC-24 ของจริงด้วยโค้ดไม่กี่บรรทัด แล้วตรวจว่า parity ของข้อความตัวอย่างออกมาถูกต้อง และการกลับค่าบิตหนึ่งบิตทำให้ไม่ผ่าน นี่คือการตรวจจับข้อผิดพลาดแบบที่ระบบสมัยใหม่ทุกระบบใช้ ในบริบทที่ข้อผิดพลาดที่หลุดรอดไปอาจทำให้เครื่องบินผีโผล่บนจอของผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศ

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับมอบหมาย
การส่งสัญญาณที่สมบูรณ์หนึ่งครั้งใช้เวลานานเท่าไร และถ้าทรานสปอนเดอร์ส่ง extended squitter วินาทีละ 4.5 ครั้ง มันใช้เวลากี่ส่วนในการส่ง ADS-B (120 ไมโครวินาที; 540 ไมโครวินาทีต่อวินาที หรือร้อยละ 0.054) ในทางทฤษฎี เครื่องบินกี่ลำจะใช้ช่องสัญญาณร่วมกันได้ก่อนที่ช่องจะไม่ว่างตลอดเวลา โดยไม่นับสิ่งอื่นที่ส่งในช่องนั้น (ประมาณ 1 850 ลำ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ความแออัดเหนือห้วงอากาศที่พลุกพล่านที่สุดเป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่เกิดขึ้นจริง)

บทเรียนที่ 4 - ฟิสิกส์

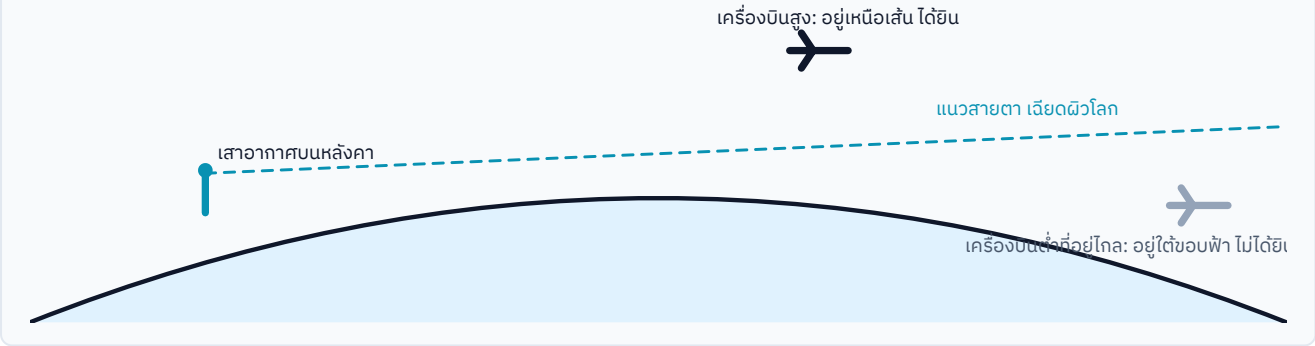
การแพร่กระจายและระยะรับ: ความโค้งของโลกและกฎกำลังสองผกผัน

เครื่องรับจะได้ยินเครื่องบินได้ไกลแค่ไหน คำถามนี้มีคำตอบสองแบบที่เป็นอิสระต่อกัน คือเชิงเรขาคณิตและเชิงพลังงาน และจุดประสงค์ของบทเรียนคือพิสูจน์ทั้งสองแบบ แล้วค้นพบว่าผู้ออกแบบจัดให้ทั้งสองตรงกัน เริ่มจากเรขาคณิต ที่ 1090 MHz คลื่นวิทยุไม่เลี้ยวเบนรอบโลกได้อย่างมีประโยชน์ มันมีพฤติกรรมเหมือนแสงและเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง เครื่องรับจึงได้ยินได้เฉพาะเครื่องบินที่อยู่เหนือขอบฟ้าของมัน คือเครื่องบินที่ลากเส้นตรงมาถึงเสาอากาศได้โดยไม่ผ่านพื้นดิน พิสูจน์ระยะขอบฟ้าร่วมกับชั้นเรียน เสาอากาศที่สูง h เหนือทรงกลมรัศมี R จะเห็นขอบฟ้าตรงที่แนว

สายตาสัมผัสทรงกลม เส้นสัมผัส รัศมีถึงจุดสัมผัส และรัศมีถึงเสาอากาศ ทำมุมฉากที่จุดสัมผัส ดังนั้นตามทฤษฎีบทพีทาโกรัส d^2 + R^2 = (R + h)^2 ได้ d^2 = 2Rh + h^2 เนื่องจาก h เล็กมากเมื่อเทียบกับ R จึงได้ d = sqrt(2Rh) เมื่อ R = 6 371 km และ h เป็นเมตร d เป็นกิโลเมตร = sqrt(2 x 6371 x h / 1000) = 3.57 sqrt(h) ความหนาแน่นของบรรยากาศ และดัชนีหักเหของมัน ลดลงตามความสูง ซึ่งทำให้รังสีวิทยุโค้งลงเล็กน้อย การแก้ไขมาตรฐานคือถือว่าโลกมีรัศมีเป็นสี่ในสามของรัศมีจริง ซึ่งเปลี่ยน 3.57 เป็น 4.12 แนวสายตาทั้งหมดจากเสาอากาศที่สูง h1 ถึงเครื่องบินที่สูง h2 คือผลรวมของระยะขอบฟ้าทั้งสอง:

```
d (km) = 4.12 x ( sqrt(h1) + sqrt(h2) )   with h1, h2 in metres
```

เสาอากาศบนหลังคาสูง 20 m เครื่องบินที่ 11 000 m: 4.12 x (4.47 + 104.9) = 451 km เสาอากาศเดิม เครื่องบินที่ 1 000 m: 4.12 x (4.47 + 31.6) = 149 km เครื่องบินบนรันเวย์ห่างออกไป 30 km: 4.12 x (4.47 + 2) = 27 km จึงไม่ได้ยิน



ให้ชั้นเรียนพล็อตกราฟ d กับ h2 สำหรับความสูงเสาอากาศของโรงเรียนตัวเอง กราฟที่ชันในตอนแรกแล้วแบนลงนี้อธิบายรูปร่างพื้นที่รับสัญญาณของเครื่องรับทุกเครื่อง คือวงกลม 400 km ขึ้นไปสำหรับเครื่องบินที่บินระดับเดินทาง ไม่กี่สิบกิโลเมตรสำหรับเครื่องบินที่กำลังร่อนลงจอด และไม่ได้ยินอะไรบนพื้นเลยยกเว้นสนามบินที่อยู่ติดกัน มันยังอธิบายด้วยว่าทำไมความสูงจึงสำคัญกว่าสมบัติอื่นใดของเครื่องรับ และทำไมเนินเขาระหว่างเรากับสนามบิน หรือปีกของเครื่องบินเองตอนเอียงเลี้ยวออกไป จึงตัดเส้นทางการติดตามได้ทันที การสาธิตในสนามจากหลักสูตรประถมศึกษาคือการมองเห็นได้ไกลกว่าเมื่อยืนบนม้านั่งเทียบกับตอนย่อตัว ไม่ได้ง่ายเกินไปสำหรับกลุ่มอายุนี้ หากตามด้วยการพิสูจน์สูตร ประเด็นคือตอนนี้นักเรียนรู้แล้วว่าทำไม

ต่อไปคือพลังงาน ทรานสปอนเดอร์แผ่กำลังสูงสุดไม่กี่ร้อยวัตต์ ออกไปเท่า ๆ กันโดยประมาณในทุกทิศทางแนวราบ ที่ระยะ d กำลังนั้นกระจายไปบนทรงกลมที่มีพื้นที่ 4 pi d^2 กำลังที่เสาอากาศซึ่งมีพื้นที่ประสิทธิผลคงที่รับได้จึงลดลงตาม 1 / d^2 นี่คือกฎกำลังสองผกผัน ซึ่งชั้นเรียนควรพิสูจน์จากพื้นที่ของทรงกลม ไม่ใช่ท่องจำ ระยะทางสองเท่า กำลังเหลือหนึ่งในสี่ สิบเท่า เหลือหนึ่งในร้อย วิศวกรวิทยุบอกการสูญเสียระหว่างเครื่องส่งไอโซทรอปิกกับเครื่องรับไอโซทรอปิกเป็นเดซิเบล และสูตรมาตรฐาน ซึ่งกลุ่มอายุมากจะเชื่อตามไปก่อนหรือพิสูจน์จากพื้นที่ประสิทธิผลของเสาอากาศ lambda^2 / 4 pi ก็ได้ คือ:

```
path loss (dB) = 20 log10( d in km ) + 20 log10( f in MHz ) + 32.44
```

ที่ 400 km และ 1090 MHz: 20 x 2.60 + 20 x 3.04 + 32.44 = 52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 dB เครื่องส่ง 250 W คือ +54 dBm กำลังที่รับได้คือ 54 - 145 = -91 dBm หรือประมาณ 8 x 10^-13 W หนึ่งในล้านของหนึ่งในล้านวัตต์

ใช้เวลาสักสองสามนาทีกับเดซิเบล หากชั้นเรียนยังไม่เคยเรียน เพราะเดซิเบลเปลี่ยนการคูณที่ครอบคลุมสิบสี่อันดับขนาดให้เป็นการบวก และเพราะตัวเลขนี้เองก็ให้ข้อคิด เครื่องรับบนหลังคากำลังตรวจจับสัญญาณที่อ่อนกว่าสัญญาณที่ออกจากเครื่องบิน 10^14.5 เท่า เครื่องรับสำหรับงานอดิเรกที่ดีถอดรหัสได้ถึงประมาณ -100 dBm จึงยังเหลือเผื่อประมาณ 9 dB ที่ 400 km กล่าวคือ ข้อจำกัดด้านพลังงานกับขอบฟ้าเชิงเรขาคณิตสำหรับเครื่องบินโดยสารที่บินระดับเดินทางตกอยู่ที่จุดเดียวกัน นั่นไม่ใช่ความบังเอิญ กำลังส่งของทรานสปอนเดอร์และมาตรฐานของเครื่องรับถูกกำหนดให้ได้ยินเครื่องบินได้ถึงขอบฟ้าและไม่ไกลกว่านั้นมาก ซึ่งช่วยไม่ให้ช่องสัญญาณล้นไปด้วยการส่งสัญญาณจากประเทศข้างเคียง

รายละเอียดเพิ่มเติมสองข้อสำหรับกลุ่มอายุมาก ข้อแรกคือดอปเพลอร์ เครื่องบินที่เข้าใกล้ด้วยความเร็ว 250 m/s ทำให้ความถี่ที่รับได้เลื่อนไป f x v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz น้อยกว่าหนึ่งในล้านส่วนของคลื่นพาห์ ซึ่งเครื่องรับไม่มีทางสังเกตเห็น ให้เปรียบเทียบกับการเลื่อนดอปเพลอร์ที่ได้ยินได้ของเสียงเครื่องบิน ซึ่ง v / c คือ 250 / 343 และระดับเสียงเปลี่ยนไปเกือบหนึ่งช่วงคู่แปดขณะที่มันบินผ่าน ข้อสองคือเวลาเดินทางของสัญญาณ 400 km ด้วยความเร็ว c ใช้เวลา 1.33 ms ตำแหน่งในข้อความจึงเก่าไปแล้ว 1.33 ms ซึ่งระหว่างนั้นเครื่องบินเคลื่อนที่ไป 33 cm ไม่มีผลอะไรสำหรับแผนที่ แต่เป็นตัวชี้ขาดสำหรับมัลติเลเทอเรชันในบทเรียนที่ 2 ซึ่งอาศัยไมโครวินาทีเหล่านี้โดยตรง

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับมอบหมาย
เครื่องรับบนเสาสูง 10 m ได้ยินเครื่องบินที่บินระดับเดินทางที่ 11 000 m แต่ไม่ได้ยินเครื่องบินเล็กที่ 600 m ซึ่งอยู่ห่างออกไป 130 km เครื่องบินเล็กอยู่ใต้ขอบฟ้าหรือไม่ (ขอบฟ้า: 4.12 x (3.16 + 24.5) = 114 km ดังนั้นใช่) เครื่องรับต้องอยู่สูงเท่าไรจึงจะได้ยิน (ต้องการ 4.12 x (sqrt(h1) + 24.5) = 130 ดังนั้น sqrt(h1) = 7.05, h1 = 50 m)

บทเรียนที่ 5 - ฟิสิกส์และวิศวกรรม

เสาอากาศและเครื่องรับ: จากคลื่นยาว 27 เซนติเมตร สู่จุดบนแผนที่

เสาอากาศคือตัวนำที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งผ่านมาเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสสลับ เสาอากาศรับและเสาอากาศส่งเป็นอุปกรณ์เดียวกันที่ทำงานในทิศทางตรงข้าม ซึ่งเป็นภาวะสลับกันได้ (reciprocity) ที่ควรบอกชั้นเรียนอย่างชัดเจน กระแสเหนี่ยวนำจะมากที่สุดเมื่อตัวนำเกิดการสั่นพ้อง คือเมื่อความยาวของมันทำให้การกระจายของกระแสตามตัวนำเข้ากับการสั่นของคลื่นพอดี เหมือนกับที่สายที่ยาวพอเหมาะสั่นพ้องกับโน้ตเสียงหนึ่ง หรือชิงช้าที่แกว่งรับจังหวะการผลักแบบหนึ่ง ตัวนำตรงมีการสั่นพ้องพื้นฐานที่ครึ่งความยาวคลื่น คือ 13.75 cm ที่ 1090 MHz โดยกระแสมากที่สุดตรงกลางและเป็นศูนย์ที่ปลายทั้งสองข้าง เสาอากาศ ADS-B ที่ใช้จริง ทั้งบนเครื่องบินและบนเครื่องรับส่วนใหญ่ คือโมโนโพลหนึ่งในสี่ความยาวคลื่น เป็นแท่งตั้งยาว 6.9 cm บนระนาบกราวด์ที่นำไฟฟ้า ซึ่งสะท้อนภาพของแท่งนั้นทางไฟฟ้า ทำให้แท่งกับภาพสะท้อนรวมกันเป็นไดโพลครึ่งความยาวคลื่น บนเครื่องบิน ลำตัวเครื่องคือระนาบกราวด์ ส่วนเสาอากาศ 1090 MHz ที่ซื้อมาก็ซ่อนรูปทรงเรขาคณิตแบบเดียวกันไว้ในท่อ ซ้อนกันหลายชั้นเพื่อรวมความไวไปทางขอบฟ้า แบบจำลองที่สร้างในชั้นเรียนจากแท่งยาว 6.9 cm บนฝากระป๋องแสดงให้เห็นรูปทรงเรขาคณิตและความยาว ซึ่งวัดด้วยไม้บรรทัดเทียบกับคลื่นยาว 27.5 cm แต่เครื่องรับในโครงงานใช้เสาอากาศที่ปรับจูนมาจากโรงงาน เพราะความผิดพลาดเพียงไม่กี่มิลลิเมตรทำให้เสาอากาศที่ทำเองคลาดการปรับจูน และได้ยินท้องฟ้าเพียงส่วนน้อย

พัฒนาเรื่องรูปแบบการแผ่คลื่น เพราะมันทำนายสิ่งที่ชั้นเรียนสังเกตได้ โมโนโพลแนวดิ่งแผ่และรับคลื่นได้แรงที่สุดในทิศทางขอบฟ้า และไม่ได้เลยในแนวแกนของตัวเอง ความไวของมันเมื่อพล็อตในสามมิติเป็นรูปโดนัท โดยมีเสาอากาศเสียบอยู่ตรงรูกลาง เครื่องรับจึงมักได้ยินเครื่องบินที่อยู่ห่างออกไป 300 km ได้ชัดเจน แต่หลุดเครื่องบินที่บินผ่านเหนือ

ศีรษะพอดีไปสองสามวินาที และชั้นเรียนดูปรากฏการณ์นี้ได้บนเครื่องรับของตัวเอง เสาอากาศแบบคอลลิเนียร์ (collinear) ซึ่งมีส่วนที่สั่นพ้องหลายชิ้นซ้อนกัน บีบโดนัทให้แบนลง เพิ่มความไวที่ขอบฟ้าซึ่งเป็นที่อยู่ของเครื่องบินที่อยู่ไกล โดยแลกกับรูเหนือศีรษะ นี่คืออัตราขยายของเสาอากาศ (antenna gain) แสดงเป็น dBi และมันมาจากการกระจายความไวใหม่ ไม่ใช่การสร้างความไวขึ้นมา โพลาไรเซชันจากบทเรียนที่ 1 ตอนนี้มีผลในทางปฏิบัติที่โครงงานจะทดสอบ คือ เสาอากาศต้องตั้งในแนวดิ่ง

ระหว่างเสาอากาศกับคอมพิวเตอร์มีสามขั้นตอน แต่ละขั้นเป็นบทเรียนเล็ก ๆ ตัวกรองแถบผ่าน (band-pass filter) ปล่อยให้ 1090 MHz ผ่าน และกันการส่งสัญญาณโทรศัพท์มือถือที่แรงกว่ามากซึ่งอยู่ห่างออกไปไม่กี่ร้อยเมกะเฮิรตซ์ ซึ่งถ้าไม่กันไว้จะทำให้เครื่องขยายอิ่มตัว เครื่องขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (low-noise amplifier) ซึ่งติดตั้งที่เสาอากาศแทนที่จะติดที่เครื่องรับ ขยายสัญญาณขึ้นพันเท่าก่อนเข้าสายเคเบิล ลำดับนี้สำคัญ เพราะสายโคแอกเซียลที่ 1090 MHz สูญเสียสัญญาณประมาณครึ่งหนึ่ง หรือ 3 dB ทุก ๆ สิบเมตร และการขยายหลังการสูญเสียจะขยายสัญญาณรบกวนของสายไปพร้อมกับสัญญาณ จากนั้นคือวิทยุที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (software-defined radio) อุปกรณ์ USB ราคา 20 ยูโรที่แต่เดิมผลิตเป็นจูนเนอร์ทีวี ซึ่งแปลงความถี่สัญญาณลงสู่เบสแบนด์และสุ่มตัวอย่างสองล้านครั้งต่อวินาทีออกมาเป็นสายตัวเลข จากจุดนั้น ปัญหาวิทยุกลายเป็นปัญหาการเขียนโปรแกรม ซอฟต์แวร์ฟรีสแกนหารูปแบบส่วนนำในสายตัวอย่าง วัดว่าครึ่งไหนของแต่ละช่องไมโครวินาทีมีพลังงานมากกว่า ประกอบเป็น 112 บิต คำนวณ CRC และถ้าผ่านก็ถอดรหัสช่องข้อมูลต่าง ๆ จากนั้นโปรแกรมติดตามจะจับคู่เฟรมตำแหน่งคู่กับคี่ รวมตำแหน่ง ความเร็ว และการระบุตัวตนเข้าด้วยกันตามที่อยู่ ICAO และเก็บสถานะของเครื่องบินแต่ละลำไว้จนกว่าข้อความจะหยุดมา

ให้ห่วงโซ่นี้แก่ชั้นเรียนเป็นแผนภาพที่นักเรียนวาดเอง พร้อมปริมาณในแต่ละขั้น ได้แก่ กระแสสลับระดับนาโนโวลต์ที่เสาอากาศ ไมโครโวลต์หลังเครื่องขยาย ตัวเลข 8 บิตสองล้านตัวต่อวินาทีที่ออกจาก SDR เฟรม 112 บิตที่ออกจากตัวถอดรหัส อาจถึงไม่กี่ร้อยเฟรมต่อวินาที และหนึ่งระเบียนต่อเครื่องบินหนึ่งลำที่ออกจากโปรแกรมติดตาม ประเด็นที่ต้องให้ถึงคือ จุดบนแผนที่คือปลายสุดของห่วงโซ่ที่แต่ละข้อต่อเป็นแนวคิดที่นักเรียนเข้าใจแล้ว ได้แก่ การสั่นพ้อง การกรอง การขยาย การสุ่มตัวอย่าง การจับคู่รูปแบบ การถอดรหัส การตรวจข้อผิดพลาด และการรวบรวมข้อมูล

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับมอบหมาย
สายเคเบิลสูญเสีย 3 dB ต่อ 10 m ที่ 1090 MHz สายยาว 20 m จึงสูญเสียสัญญาณไปกี่ส่วน (6 dB หรือสามในสี่) ถ้าขีดจำกัดของเครื่องรับคือ -100 dBm และสัญญาณที่เสาอากาศจากเครื่องบินที่ 400 km คือ -91 dBm สัญญาณจะผ่านสายเคเบิลได้โดยไม่มีเครื่องขยายหรือไม่ (แค่เฉียดฉิว: -97 dBm การสูญเสียเพิ่มอีกเพียงเล็กน้อย เช่น ฝนบนขั้วต่อ หรือสายที่ยาวกว่านี้ เครื่องบินที่ขอบฟ้าก็จะหายไป นี่คือเหตุผลที่เครื่องขยายต้องอยู่ที่เสาอากาศ)

โครงงาน - สองถึงสี่สัปดาห์

สร้างเครื่องรับและทดสอบฟิสิกส์กับท้องฟ้าจริง

โครงงานเปลี่ยนห้าบทเรียนให้เป็นการวัด อุปกรณ์ได้แก่ ดองเกิล USB ที่เป็นวิทยุกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (ประมาณ 25 ยูโร) เสาอากาศ 1090 MHz ที่ปรับจูนมาจากโรงงาน (50 ถึง 70 ยูโร) สายโคแอกเซียลไม่กี่เมตร และแล็ปท็อปหรือ Raspberry Pi ที่รันตัวถอดรหัสฟรีตัวใดตัวหนึ่ง (dump1090 และรุ่นที่สืบทอดมาเป็นมาตรฐาน) การติดตั้งใช้เวลาหนึ่งบ่าย และภายในไม่กี่นาทีซอฟต์แวร์จะแสดงตารางเครื่องบินพร้อมที่อยู่ ICAO นามเรียกขาน ตำแหน่ง ความสูง และความเร็ว รวมทั้งแผนที่ ทุกอย่างในโครงงานเป็นการรับอย่างเดียว ไม่มีอะไรส่งสัญญาณออกไป และชั้นเรียนควรเข้าใจ

ว่าการส่งสัญญาณบนความถี่การบินเป็นทั้งสิ่งผิดกฎหมายและอันตราย การขึ้นไปบนหลังคาต้องได้รับอนุญาตตามปกติของโรงเรียน หน้าต่างบนชั้นสูงที่หันไปทางเส้นทางการบินหลักก็เป็นจุดเริ่มต้นที่ดีพอ หน้า "Become a feeder" (เป็นฟีดเดอร์) บนเว็บไซต์นี้แนะนำการติดตั้งแบบเดียวกันทีละขั้นตอน และให้เครื่องรับของโรงเรียนส่งข้อมูลขึ้นแผนที่สดได้

การสำรวจแรกคือขอบฟ้าวิทยุ ตัวถอดรหัสรายงานระยะทางและความสูงที่ได้ยินเครื่องบินแต่ละลำเป็นครั้งสุดท้ายตลอดหนึ่งวัน ให้รวบรวมระยะรับสูงสุดของเครื่องบินในช่วงความสูงต่าง ๆ แล้วพล็อตระยะรับเทียบกับความสูง นักเรียนมีสูตรจากบทเรียนที่ 4 และความสูงของเสาอากาศ จึงควรทำนายกราฟก่อนเห็นข้อมูล แล้วจึงเปรียบเทียบ ผลมักสอดคล้องกันดีสำหรับเครื่องบินที่บินสูง และแย่ลงสำหรับเครื่องบินที่บินต่ำ และการอภิปรายว่าทำไม (อาคาร ภูมิประเทศ รูเหนือศีรษะของเสาอากาศ การบังสัญญาณจากตัวเครื่องบินเอง) คือการเผชิญหน้าระหว่างทฤษฎีกับการวัดแบบที่หนังสือเรียนให้ไม่ได้ แผนที่ของเครื่องบินที่ไกลที่สุดที่ได้ยินในแต่ละทิศทาง ซึ่งซอฟต์แวร์วาดให้ จะแสดงภูมิประเทศของทั้งภูมิภาคเป็นเงาในพื้นที่รับสัญญาณ

การสำรวจที่สองคือเสาอากาศ เปรียบเทียบอัตราข้อความและระยะรับสูงสุดเมื่อเสาอากาศอยู่ในห้อง ที่หน้าต่าง และบนหลังคา ตั้งแนวดิ่งและวางนอน ตั้งบนพื้นผิวโลหะและถือห่างจากโลหะใด ๆ การเปรียบเทียบแต่ละครั้งทดสอบข้อกล่าวอ้างเฉพาะจากบทเรียนที่ 1 และ 5 และควรทำนายผลแต่ละครั้งก่อน การทดสอบโพลาไรเซชันน่าทึ่งที่สุด เมื่อวางนอนราบ เสาอากาศจะหลุดเครื่องบินไปเกือบทั้งหมด

การสำรวจที่สามคือข้อมูล บันทึกการจราจรทางอากาศเต็มหนึ่งวันแล้วตั้งคำถามกับข้อมูล เช่น ชั่วโมงที่พลุกพล่านที่สุด การกระจายของความสูงระดับเดินทาง (นักเรียนคาดว่าจะกระจายกว้าง แต่พบว่าเครื่องบินโดยสารส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 10 000 ถึง 12 000 m) อัตราไต่ของเครื่องบินที่ออกจากสนามบินที่ใกล้ที่สุด และประเทศที่เครื่องบินผ่านบ่อยที่สุด (จากการจัดสรรที่อยู่ ICAO) กลุ่มอายุมากถอดรหัสข้อความดิบได้เองจากเลขฐานสิบหกที่ซอฟต์แวร์บันทึกไว้ และตรวจ CRC ด้วยโค้ดของตัวเอง ชั้นเรียนที่มีเครื่องรับที่สองอยู่ที่โรงเรียนพันธมิตรซึ่งห่างออกไป 30 กิโลเมตรขึ้นไป โดยทั้งสองเครื่องให้ข้อมูลที่มีการประทับเวลาจาก GNSS สามารถลองทำมัลติเลเทอเรชันสองมิติของเครื่องบินที่ทั้งสองได้ยิน แล้วเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่เครื่องบินกระจายออกมา นี่คือผลลัพธ์ที่ท้าทายที่สุดของหลักสูตร และเป็นผลลัพธ์จริง

ปิดท้ายด้วยคำถามที่ระบบนี้ทำให้เกิดขึ้นแต่ไม่ได้ตอบ ข้อความเหล่านี้ไม่มีลายเซ็นดิจิทัล เครื่องส่งจึงอาจกระจายเครื่องบินผีออกมาได้ อะไรปกป้องระบบนี้ และถ้าทำเป็นแบบมีลายเซ็นจะมีต้นทุนเท่าไร เครื่องบินพึ่งพาดาวเทียมที่ถูกรบกวนสัญญาณได้ จะเกิดอะไรขึ้นกับภาพที่ผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศเห็นเมื่อเกิดเหตุนั้น ข้อมูลนี้ระบุตัวเครื่องบินได้ และเครื่องบินอาจระบุตัวบุคคลได้ ใครควรติดตามใครได้บ้าง ชั้นเรียนที่ได้สร้างเครื่องรับแล้วสมควรได้รับคำถามเหล่านี้ และคำถามเหล่านี้เหมาะกับการเขียนเรียงความหรือการอภิปรายปิดท้าย

เฉลยโจทย์ท้าทายของนักเรียน

หน้าของนักเรียนมีโจทย์ท้าทายแปดข้อ บทเรียนละหนึ่งหรือสองข้อ ซึ่งใช้เป็นการบ้านหรือแบบทดสอบท้ายหลักสูตรได้ เฉลยพร้อมเหตุผลที่คำตอบซึ่งได้คะแนนเต็มควรมี:

1. ความยาวคลื่นที่ 1090 MHz: lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m ส่วนที่ยาวหนึ่งในสี่ความยาวคลื่น: 6.9 cm เหตุผล: c = f x lambda โดยความเร็วแสงที่คงที่บังคับให้เกิดความสัมพันธ์แบบผกผัน
2. แสงเร็วกว่าเสียง 3.00 x 10^8 / 343 หรือประมาณ 875 000 เท่า ในระยะ 30 km ข้อความใช้เวลา 100 ไมโครวินาที และเสียงใช้เวลา 87 s เครื่องบินที่บินด้วยความเร็ว 250 m/s เคลื่อนที่ได้ 22 km ในเวลานั้น

3. นาฬิกาคลาดเคลื่อน 2 ไมโครวินาทีทำให้ระยะคลาดเคลื่อน 2 x 10^-6 x 3 x 10^8 = 600 m ต้องใช้ดาวเทียมสี่ดวง เพราะค่าชดเชยนาฬิกาของเครื่องรับเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าตัวที่สี่ นอกเหนือจาก x, y และ z
4. 2^24 = 16 777 216 ที่อยู่ ข้อความ 112 บิตที่อัตรา 1 บิตต่อไมโครวินาทีใช้เวลา 112 ไมโครวินาที หรือ 120 ไมโครวินาทีเมื่อรวมส่วนนำ
5. ใน 8D4840D6... 8D คือ 10001101 ห้าบิตแรก 10001 คือ 17 ดังนั้น DF = 17 คือข้อความ ADS-B จากทรานสปอนเดอร์ Mode S สามบิตถัดไป 101 ให้ CA = 5 และ 4840D6 คือที่อยู่ ICAO
6. ขอบฟ้าวิทยุจากเสาอากาศสูง 15 m ถึงเครื่องบินที่ 9 000 m: 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km สำหรับเครื่องบินที่ 300 m: 4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km
7. ระยะทางเพิ่มสองเท่าทำให้กำลังที่รับได้เหลือหนึ่งในสี่ เพราะกำลังส่งเท่าเดิมกระจายบนทรงกลมที่มีพื้นที่มากขึ้นสี่เท่า การสูญเสียตามเส้นทางที่ 200 km และ 1090 MHz: 20 x 2.30 + 60.7 + 32.4 = 139 dB น้อยกว่าที่ 400 km อยู่ 6 dB สอดคล้องกับอัตราส่วนสี่เท่า
8. เสาอากาศที่วางนอนมีโพลาไรเซชันตั้งฉากกับคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแนวดิ่ง และรับได้น้อยมาก กระแสเหนี่ยวนำขึ้นกับองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่อยู่ตามแนวตัวนำ เครื่องรับที่ชั้นล่างสูญเสียระยะรับเพราะระยะขอบฟ้า 4.12 x sqrt(h1) ลดลง และเพราะอาคารบังแนวสายตา

ต่อไป

โครงงาน ทีละขั้นตอน

โครงงานของบทเรียนที่ 6 ถือว่ามีเครื่องรับอยู่แล้ว ส่วนเวิร์กช็อปภาคปฏิบัติจะสร้างเครื่องรับนั้นขึ้นมา เวิร์กช็อปเขียนไว้สำหรับผู้ที่ไม่เคยใช้ Raspberry Pi มาก่อน ได้แก่ รายการของที่ต้องซื้อพร้อมราคา เสาอากาศที่ควรเลือก ตำแหน่งติดตั้งและการสูญเสียในสายเคเบิล การเตรียม Pi คำสั่งสามคำสั่งที่ติดตั้งฟีดเดอร์ของ Dataero การอ้างสิทธิ์สถานี การปรับเกน และการวัดห้าอย่าง บทเรียนละหนึ่งอย่าง ที่ทดสอบฟิสิกส์กับท้องฟ้าจริง สถานีที่ส่งข้อมูลให้ Dataero จะให้แดชบอร์ด แผนที่พื้นที่รับสัญญาณ และประวัติข้อมูลหนึ่งปีแก่ชั้นเรียนเพื่อใช้ทำงานต่อ

เปิดเวิร์กช็อปภาคปฏิบัติ `https://radar.dataero.eu/th/learning/workshop`