ฟิสิกส์และคอมพิวเตอร์ - อายุ 12 ถึง 18 ปี

ถอดรหัสท้องฟ้า

บรรทัดเลขฐานสิบหกด้านล่างนี้คือข้อความจริง ที่เครื่องบินลำจริงส่งออกมาประมาณวินาทีละสองครั้ง ภายในเวลา 112 ในล้านส่วนของวินาที ข้อความนี้บอกว่าเครื่องบินลำนี้คือใคร และในข้อความชุดเดียวกันอื่น ๆ ก็บอกว่ามันอยู่ที่ไหน สูงเท่าไร และเร็วเท่าไร บทเรียนนี้จะพาเราไปทำความเข้าใจทุกอย่างที่จำเป็น ได้แก่ ฟิสิกส์ของคลื่นที่พาข้อความไป การจับเวลาที่ทำให้เครื่องบินรู้ตำแหน่งของตัวเอง การเข้ารหัสที่อัดข้อมูลทั้งหมดลงใน 112 บิต เรขาคณิตที่จำกัดว่าเราจะได้ยินได้ไกลแค่ไหน และเครื่องรับที่เราสร้างเองได้ เพื่อฟังสัญญาณนี้ด้วยตัวเอง

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

สารบัญ

ADS-B คืออะไร สรุปในหน้าเดียว

บทเรียนที่ 1 คลื่น: คลื่นวิทยุคือแสงที่มองไม่เห็น

บทเรียนที่ 2 เวลาและตำแหน่ง: เครื่องบินรู้ได้อย่างไรว่าตัวเองอยู่ที่ไหน

บทเรียนที่ 3 ข้อความ: 112 บิต และวิธีจับข้อผิดพลาด

บทเรียนที่ 4 ระยะรับ: ความโค้งของโลกและกฎกำลังสองผกผัน

บทเรียนที่ 5 เสาอากาศและเครื่องรับ: จากคลื่นยาว 27 เซนติเมตร สู่จุดบนแผนที่

โจทย์ท้าทาย

ต่อไป ลงมือสร้าง

ADS-B คืออะไร สรุปในหน้าเดียว

> 8D **4840D6** 202CC371C32CE0 576098
>
> extended squitter หนึ่งข้อความตามที่เครื่องรับบันทึกไว้: เลขฐานสิบหก 28 หลัก หรือ 112 บิต พอถึงบทที่ 3 เราจะอ่านได้ทุกช่องข้อมูลของมัน

ฝ่ายควบคุมการจราจรทางอากาศต้องรู้ตลอดเวลาว่าเครื่องบินทุกลำอยู่ที่ไหน เพื่อไม่ให้เครื่องบินเข้าใกล้กันเกินไป เครื่องบินโดยสารที่บินระดับเดินทางเคลื่อนที่ได้ 250 m ทุกวินาที และกฎการแยกระยะกำหนดให้เครื่องบินที่อยู่ภายใต้การควบคุมด้วยเรดาร์ต้องห่างกัน 300 m ในแนวดิ่ง หรือ 9 km ในแนวราบ ตลอดเจ็ดสิบปีที่ผ่านมา วิธีที่ใช้ก็คือเรดาร์สถานีภาคพื้นดินส่งพัลส์ออกไปแล้วจับเวลาเสียงสะท้อนกลับ หรือในแบบที่พัฒนาขึ้นที่เรียกว่าเรดาร์ทุติยภูมิ สถานีจะส่งคำถามไปยังทรานสปอนเดอร์บนเครื่องบิน ซึ่งจะตอบกลับที่ความถี่ 1090 MHz พร้อมรหัสประจำตัวและความสูง แต่เรดาร์ก็มีข้อจำกัด มันต้องใช้กำลังส่งมหาศาล มองเห็นเครื่องบินแต่ละลำได้เพียงครั้งเดียวต่อการหมุนเสาอากาศหนึ่งรอบ และครอบคลุมมหาสมุทรหรือภูเขาไม่ได้

ADS-B ย่อมาจาก Automatic Dependent Surveillance - Broadcast ซึ่งกลับโจทย์นี้ด้านเสียใหม่ เครื่องบินสมัยใหม่ทุกลำมีเครื่องรับสัญญาณนำทางด้วยดาวเทียม จึงรู้ตำแหน่งของตัวเองได้แม่นยำในระดับไม่กี่เมตร ADS-B แค่ให้ทรานสปอนเดอร์ของเครื่องบินประกาศตำแหน่งนั้นออกไป พร้อมรหัสประจำตัว ความสูง และความเร็ว ประมาณวินาทีละสองครั้ง ที่ความถี่ 1090 MHz โดยไม่ได้ส่งถึงใครเป็นพิเศษ ที่เรียกว่า Automatic (อัตโนมัติ) เพราะไม่มีอะไรต้องไป

สั่งให้ส่ง Dependent (พึ่งพา) เพราะข้อมูลทั้งหมดมาจากอุปกรณ์ของเครื่องบินเอง Surveillance (การเฝ้าติดตาม) เพราะจุดประสงค์คือการรู้ว่าเครื่องบินอยู่ที่ไหน และ Broadcast (การกระจายสัญญาณ) เพราะส่งแบบเปิดเผยให้ใครก็ตามที่ฟังอยู่ ตั้งแต่ปี 2020 เครื่องบินส่วนใหญ่ในห้วงอากาศของยุโรปและอเมริกาต้องมี ADS-B ผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศใช้มันควบคู่กับเรดาร์ เครื่องบินลำอื่นใช้มันเพื่อมองเห็นกันและกัน และเครื่องรับ USB ราคา 25 ยูโรบนหลังคาโรงเรียนก็ได้ยินข้อความชุดเดียวกันทุกประการ

การจะเข้าใจระบบนี้ เราต้องเข้าใจห้าเรื่อง และแต่ละเรื่องคือหนึ่งบทเรียน ได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่พาข้อความไป การจับเวลาที่ทำให้เครื่องบินรู้ตำแหน่งของตัวเอง และทำให้เครือข่ายหาตำแหน่งเครื่องบินที่ไม่ยอมบอกว่าตัวเองอยู่ที่ไหนได้ ข้อความดิจิทัลและวิธีตรวจจับข้อผิดพลาดในข้อความ เรขาคณิตและพลังงานที่จำกัดว่าจะได้ยินได้ไกลแค่ไหน และเสาอากาศกับเครื่องรับที่แปลงสัญญาณกลับเป็นข้อมูล เนื้อหาฉบับเต็มอยู่ในหลักสูตรอ้างอิง ให้อ่านบทที่ 3 และ 5 ของหลักสูตรนั้นก่อนบทเรียนที่ 3 และอ่านบทที่ 6 ถึง 8 ก่อนบทเรียนที่ 4 และ 5

บทเรียนที่ 1

คลื่น: คลื่นวิทยุคือแสงที่มองไม่เห็น

ข้อความออกจากเครื่องบินในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สั่นและเคลื่อนที่ผ่านอวกาศโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ด้วยความเร็วแสง c = 3.00 x 10^8 m/s แสงที่ตาเรามองเห็นก็เป็นปรากฏการณ์เดียวกัน เพียงแต่มีความถี่สูงกว่า ตาของเราตอบสนองต่อความถี่ประมาณ 4 ถึง 8 x 10^14 Hz ส่วน ADS-B ส่งที่ 1.09 x 10^9 Hz ต่ำกว่าถึงห้าแสนเท่า ข้อความจากเครื่องบินกับแสงจากหน้าจอนี้ไม่ได้ต่างกันโดยธรรมชาติ ต่างกันแค่ความถี่เท่านั้น

เนื่องจากคลื่นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ความถี่จึงเป็นตัวกำหนดความยาวคลื่น ในหนึ่งวินาที คลื่นเคลื่อนที่ไปได้ c เมตร และครบ f รอบ ดังนั้นแต่ละรอบจึงยาว c / f เมตร: c = f x lambda สำหรับ ADS-B จะได้ lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m คลื่นที่เดินทางระหว่างเครื่องบินกับเสาอากาศของเรามียอดคลื่นห่างกัน 27.5 cm อยู่ระหว่างสัญญาณโทรศัพท์มือถือ (17 cm) กับสถานีวิทยุ FM (3 m) บนสเปกตรัม ลองวาดสเปกตรัมนั้นเอง บนแกนลอการิทึมตั้งแต่ 10^6 Hz ถึง 10^18 Hz แล้ววางตำแหน่งของวิทยุ FM, ADS-B, โทรศัพท์มือถือ, Wi-Fi, อินฟราเรด, แสงที่มองเห็นได้ และรังสีเอกซ์ จะเห็นว่าคลื่นของเครื่องบินอยู่ท่ามกลางสิ่งของในกระเป๋าเราเอง

```
c = f x lambda
```

3.00 x 10^8 m/s = 1.09 x 10^9 Hz x 0.275 m

สิ่งที่คลื่นวิทยุไม่ใช่ก็คือเสียง เสียงเป็นคลื่นความดันในตัวกลาง เคลื่อนที่ 343 m/s ในอากาศ 1 500 m/s ในน้ำ และเคลื่อนที่ไม่ได้เลยในสุญญากาศ คลื่นวิทยุคือแสง ไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ด้วยเหตุนี้มันจึงข้ามสุญญากาศจากดาวเทียมมาถึงเครื่องบินได้ และเร็วกว่าเสียง 3.00 x 10^8 / 343 เท่า หรือประมาณ 875 000 เท่า ถ้าเครื่องบินที่อยู่ห่างออกไป 30 km ปล่อยเสียงและข้อความออกมาพร้อมกัน ข้อความจะมาถึงใน 100 ไมโครวินาที ส่วนเสียงจะมาถึงหลังจากนั้น 87 วินาที ซึ่งตอนนั้นเครื่องบินบินไปแล้ว 22 km คลื่นในเชือกมีสมบัติสำคัญเหมือนแสง คือมีความยาวคลื่น ความถี่ และความเร็วคงที่ ดังนั้นถ้าสะบัดเชือกเร็วขึ้นก็จะได้คลื่นที่สั้นลง ไม่ใช่คลื่นที่เร็วขึ้น ต่างกันตรงที่มันต้องมีเชือก

มีสมบัติหนึ่งของคลื่นที่จะสำคัญในบทเรียนที่ 5 คือโพลาไรเซชัน สนามไฟฟ้าสั่นในทิศทางที่แน่นอน ตั้งฉากกับทิศที่คลื่นเคลื่อนที่ เสาอากาศของเครื่องบินตั้งในแนวดิ่ง คลื่น ADS-B จึงมีโพลาไรเซชันแนวดิ่ง และเสาอากาศรับที่วางนอนตะแคงจะรับคลื่นได้แทบไม่ได้เลย เหมือนคลื่นในเชือกที่สะบัดขึ้นลงจะถูกกั้นไว้ด้วยช่องแนวนอน ลองทำนายตอนนี้เลยว่าระยะรับของเครื่องรับจะเป็นอย่างไรถ้าวางเสาอากาศในแนวนอน แล้วเราจะได้ทดสอบในโครงงาน

บทเรียนที่ 2

เวลาและตำแหน่ง: เครื่องบินรู้ได้อย่างไรว่าตัวเองอยู่ที่ไหน

ตำแหน่งในทุกข้อความ ADS-B มาจากระบบนำทางด้วยดาวเทียม และระบบนำทางด้วยดาวเทียมก็คือการวัดเวลา แต่ละระบบ (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) มีดาวเทียมประมาณสามสิบดวง โคจรอยู่ที่ความสูงราว 20 200 km แต่ละดวงมีนาฬิกาอะตอม และส่งสัญญาณบอกตำแหน่งของตัวเองและเวลาที่ส่งที่แน่นอน เครื่องรับบนเครื่องบินจะจดเวลาที่สัญญาณมาถึง ผลต่างของเวลาคูณด้วย c คือระยะทางถึงดาวเทียมดวงนั้น ถ้าดาวเทียมอยู่ตรงศีรษะพอดี สัญญาณใช้เวลา 20 200 / 300 000 = 0.0673 s ระยะทางหนึ่งค่าบอกว่าเครื่องรับอยู่บนทรงกลมรอบดาวเทียมดวงนั้น ทรงกลมสองลูกตัดกันเป็นวงกลม สามลูกตัดกันที่สองจุด ซึ่งจุดหนึ่งอยู่ไกลจากโลกมากจึงตัดทิ้งไป ดาวเทียมสามดวงก็เพียงพอถ้าเครื่องรับมีนาฬิกาที่สมบูรณ์แบบ แต่มันมีเพียงผลึกควอตซ์ที่คลาดเคลื่อนได้เป็นไมโครวินาที และหนึ่งไมโครวินาทีเท่ากับระยะ 300 m เครื่องรับจึงถือว่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาตัวเองเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าตัวที่สี่ และใช้ดาวเทียมดวงที่สี่ ได้สี่สมการ สี่ตัวแปร (x, y, z และค่าชดเชยนาฬิกา) ซึ่งแก้ไปเรื่อย ๆ ตลอดเวลา ผลพลอยได้คือเครื่องรับดาวเทียมทุกเครื่องรักษาเวลาได้แม่นยำในระดับหลายสิบนาโนวินาที ซึ่งครึ่งหลังของบทเรียนนี้ต้องอาศัยข้อนี้

จำขนาดของตัวเลขเหล่านี้ไว้ให้ดี แสงเดินทาง 0.3 m ต่อนาโนวินาที และ 300 m ต่อไมโครวินาที ตำแหน่งที่แม่นยำ 3 m หมายถึงการจับเวลาที่แม่นยำ 10 ns ถ้านาฬิกาของดาวเทียมดวงหนึ่งเดินเร็วไป 1 ไมโครวินาที เครื่องรับทุกเครื่องที่ใช้ดาวเทียมดวงนั้นจะคลาดไป 300 m ตามแนวเส้นที่ชี้ไปหาดาวเทียม นี่คือเหตุผลที่นาฬิกาของดาวเทียมต้องได้รับการแก้ไขจากภาคพื้นดินหลายครั้งต่อวัน

เครื่องบินมีความสูงสองค่า ผลคำนวณจากดาวเทียมให้ความสูงเชิงเรขาคณิตเหนือทรงรีอ้างอิง แต่ความสูงที่ส่งออกไปเพื่อการจราจรทางอากาศเป็นความสูงความกดอากาศ คือความดันอากาศที่ช่องบนลำตัวเครื่องบิน แปลงเป็นความสูงด้วยบรรยากาศมาตรฐานสากล (International Standard Atmosphere) ซึ่งสมมติว่าที่ระดับน้ำทะเลมีความดัน 1013.25 hPa อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิลดลง 6.5 องศาต่อกิโลเมตร เมื่อความดันจริงต่างจากค่ามาตรฐาน ความสูงความกดอากาศของเครื่องบินทุกลำจะผิดไปเท่ากันหมด ซึ่งก็ตรงกับสิ่งที่การแยกระยะต้องการพอดี เครื่องบินสองลำที่อ่านค่าระดับการบิน 350 และ 360 จะห่างกัน 1 000 ft เสมอ ไม่ว่าอากาศจะเป็นอย่างไร ข้อความตำแหน่งส่งความสูงความกดอากาศเป็นขั้นละ 25 ฟุต ส่วนข้อความความเร็วส่งผลต่างระหว่างความสูงความกดอากาศกับความสูงเชิงเรขาคณิต ถ้ามีโปรแกรมตารางคำนวณ ลองกลับสูตร p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255 แล้วตรวจดูว่าที่ 11 000 m ความดันอยู่ที่ประมาณ 227 hPa น้อยกว่าหนึ่งในสี่ของที่ระดับน้ำทะเล อากาศที่เครื่องบินโดยสารบินผ่านนั้นทำให้เราหมดสติได้

คราวนี้ลองกลับความคิดทั้งหมด เครื่องบินบางลำส่งสัญญาณที่ 1090 MHz โดยไม่มีตำแหน่ง เช่น ทรานสปอนเดอร์รุ่นเก่าที่ตอบเรดาร์ด้วยรหัสประจำตัวและความสูงเท่านั้น หรือเครื่องบินที่การรับสัญญาณดาวเทียมถูกรบกวน เครือข่ายเครื่องรับยังหาตำแหน่งของมันได้ด้วยวิธีมัลติเลเทอเรชัน (multilateration) สมมติว่ามีเครื่องรับสี่เครื่องที่นาฬิกาตรงกัน แต่ละเครื่องบันทึกเวลาที่สัญญาณเดียวกันมาถึง ข้อความที่ถึงเครื่องรับ A ก่อนเครื่องรับ B หนึ่งไมโครวินาที ถูกส่งมาจากจุดที่ใกล้ A มากกว่าใกล้ B อยู่ 300 m และจุดทั้งหมดที่เป็นแบบนี้รวมกันเป็นไฮเพอร์โบลอยด์ที่มี A และ B เป็นจุดโฟกัส เครื่องรับสี่เครื่องให้คู่ที่อิสระต่อกันสามคู่ จึงได้ไฮเพอร์โบลอยด์สามรูป ซึ่งตัดกันที่ตำแหน่งเครื่องบิน นี่คือโจทย์ดาวเทียมที่สลับสิ่งที่รู้กับสิ่งที่ไม่รู้ ในกรณีดาวเทียมคือเครื่องรับหนึ่งเครื่องกับเครื่องส่งที่รู้ตำแหน่งสี่เครื่อง ส่วนในกรณีนี้คือเครื่องส่งหนึ่งเครื่องกับเครื่องรับที่รู้ตำแหน่งสี่เครื่อง ทั้งสองกรณีสิ่งที่วัดคือเวลา และ 1 ไมโครวินาทีเท่ากับ 300 m เครื่องรับเหล่านี้ตั้งนาฬิกาให้ตรงกันได้แม่นยำประมาณ 100 ns จากดาวเทียมชุดเดียวกับที่เครื่องบินใช้

เราทำแบบนี้ด้วยเสียงก็ได้ ให้สามคนถือนาฬิกาจับเวลายืนอยู่ที่จุดที่วัดตำแหน่งไว้แล้วบนสนาม คนที่สี่ซ่อนตัวแล้วตบมือหนึ่งครั้ง แต่ละคนบันทึกเวลาที่ได้ยิน เสียงเดินทาง 343 m/s ผลต่างเวลา 0.1 s จึงเท่ากับ 34 m การวาดภาพตามมาตราส่วนแล้วลองหาตำแหน่ง หรือร่างเส้นไฮเพอร์โบลา จะหาคนตบมือเจอ แล้วลองถามว่านาฬิกาจับเวลาต้องแม่นยำแค่ไหนถึงจะทำแบบเดียวกันกับคลื่นวิทยุในระยะ 200 km ได้ แล้วจะเข้าใจว่าทำไมเครือข่ายจึงต้องใช้เวลาจากนาฬิกาอะตอม

บทเรียนที่ 3

ข้อความ: 112 บิต และวิธีจับข้อผิดพลาด

ทรานสปอนเดอร์ส่ง ADS-B ในรูป Mode S extended squitter ประกอบด้วยส่วนนำ (preamble) ยาว 8 ไมโครวินาที ตามด้วยบิตข้อมูล 112 บิต ด้วยอัตราหนึ่งบิตต่อไมโครวินาที ส่วนนำเป็นรูปแบบตายตัวของพัลส์สี่ลูกที่เวลา 0, 1, 3.5 และ 4.5 ไมโครวินาที หน้าที่ของมันคือตอบคำถามที่เราอาจไม่เคยคิดจะถาม ในช่องสัญญาณที่เต็มไปด้วยสัญญาณรบกวนและเครื่องบินลำอื่น เครื่องรับรู้ได้อย่างไรว่าข้อความเริ่มแล้ว และแต่ละบิตเริ่มเมื่อไร ตัวถอดรหัสเฝ้าดูรูปแบบนั้นอยู่ตลอดเวลา และเมื่อเห็นมันก็จะรู้ทั้งสองอย่าง ทุกโปรโตคอลดิจิทัลที่เราใช้ ตั้งแต่ Wi-Fi ไปจนถึง QR code ก็มีสิ่งที่ทำหน้าที่แบบเดียวกัน

เครื่องส่งทำได้แค่เปิดหรือปิด แล้วจะส่ง 1 หรือ 0 ได้อย่างไร ADS-B ใช้การมอดูเลตตำแหน่งพัลส์ (pulse position modulation) ช่องของแต่ละบิตยาวหนึ่งไมโครวินาที แบ่งเป็นสองครึ่ง ถ้ามีพัลส์ในครึ่งแรกแล้วเงียบในครึ่งหลังคือ 1 ถ้าเงียบก่อนแล้วมีพัลส์ตามมาคือ 0 แต่ละบิตจึงมีพัลส์หนึ่งลูกเสมอ ลองคิดดูว่าทำไมวิธีนี้ดีกว่า "มีพัลส์คือ 1 ไม่มีพัลส์คือ 0" เครื่องรับไม่มีวันหลุดจังหวะเวลา แม้จะเจอเลข 0 ติดกันยาว ๆ ซึ่งถ้าใช้วิธีง่าย ๆ แบบนั้นจะแยกไม่ออกจากความเงียบ และมันตัดสินแต่ละบิตด้วยการถามว่าครึ่งไหนดังกว่า แทนที่จะถามว่าพัลส์เกินระดับคงที่ระดับหนึ่งหรือไม่ ดังนั้นสัญญาณอ่อน ๆ จากระยะ 400 km ก็ถอดรหัสได้น่าเชื่อถือพอ ๆ กับสัญญาณแรงจากเครื่องบินที่อยู่เหนือศีรษะ

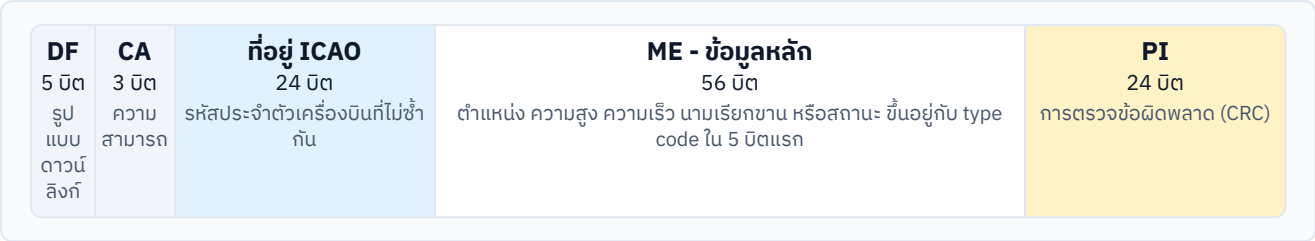
สี่บิตในการมอดูเลตตำแหน่งพัลส์: 1, 0, 1, 1



แต่ละช่องยาว 1 ไมโครวินาที พัลส์ในครึ่งแรก: 1 พัลส์ในครึ่งหลัง: 0

112 บิตจัดเรียงดังนี้ และเราควรเขียนออกมาได้จากความจำ บิตที่ 1 ถึง 5: downlink format ซึ่งเป็น 17 สำหรับ ADS-B จากทรานสปอนเดอร์ บิตที่ 6 ถึง 8: รหัสความสามารถ (capability) บิตที่ 9 ถึง 32: ที่อยู่ ICAO ขนาด 24 บิต ซึ่งเป็นรหัสประจำตัวถาวรของเครื่องบิน กำหนดให้ตอนจดทะเบียน มีทั้งหมด 2^24 = 16 777 216 ค่า แบ่งให้แต่ละประเทศเป็นช่วง ๆ ของเบลเยียมคือ 448000 ถึง 44FFFF ในเลขฐานสิบหก บิตที่ 33 ถึง 88: ช่องข้อความขนาด 56 บิต ห้าบิตแรกของช่องนี้คือ type code ซึ่งบอกว่าอีก 51 บิตที่เหลือบรรจุอะไร type code 1 ถึง 4 บรรจุนามเรียกขาน (call sign) เป็นตัวอักษร 6 บิตจำนวนแปดตัว ตัวละ 64 สัญลักษณ์ type code 9 ถึง 18 บรรจุตำแหน่งขณะบิน ได้แก่ ความสูง ความกดอากาศ 12 บิตเป็นขั้นละ 25 ฟุต แฟล็กคู่/คี่ และละติจูดกับลองจิจูดที่เข้ารหัสแล้วอย่างละ 17 บิต type code 19 บรรจุความเร็วเป็นองค์ประกอบความเร็วเทียบพื้นในแนวตะวันออก-ตะวันตกและเหนือ-ใต้ อัตราไต่หรือร่อน และผลต่างระหว่างความสูงความกดอากาศกับความสูงเชิงเรขาคณิต บิตที่ 89 ถึง 112: parity ขนาด 24 บิต ลองตรวจตัวเลขดู ความสูง 12 บิต ขั้นละ 25 ft ครอบคลุมได้ 102 400 ft ส่วน 17 บิตถ้าใช้ตรง ๆ กับละติจูด 180 องศาจะละเอียดได้แค่ 1.4 km ตำแหน่งแม่นยำกว่านั้นได้เพราะการรายงานตำแหน่งแบบกะทัดรัด (compact position

reporting) 17 บิตบอกตำแหน่งภายในโซนได้แม่นยำถึงไม่กี่เมตร แต่ไม่ได้บอกว่าเป็นโซนไหน และเครื่องบินจะส่งสลับกันระหว่างตารางโซนสองชุด คือชุดคู่และชุดคี่ เครื่องรับที่ได้ยินครบทั้งสองแบบจะระบุโซนได้แน่นอน หลังจากนั้นก็ติดตามต่อได้จากข้อความเดียว ได้ความแม่นยำมากขึ้นจากบิตจำนวนเท่าเดิม โดยแลกกับเวลา



มาผ่าข้อความจริงที่อยู่ด้านบนสุดของหน้านี้กัน 8D4840D6202CC371C32CE0576098 คือเลขฐานสิบหก 28 หลัก หรือ 112 บิต สองหลักแรก 8D คือ 1000 1101 ในเลขฐานสอง ห้าบิตแรก 10001 คือ 17 ดังนั้นนี่คือ ADS-B จากทรานสปอนเดอร์ และสามบิตถัดไป 101 ให้ค่า capability 5 หกหลักถัดไป 4840D6 คือที่อยู่ ICAO ซึ่งตารางการจัดสรรระบุว่าอยู่ในเนเธอร์แลนด์ คู่หลักถัดไป 20 ขึ้นต้นด้วย 00100 คือ type code 4 ข้อความระบุตัวตน และเมื่อถอดรหัสตัวอักษร 6 บิตที่ตามมาจะได้นามเรียกขาน KLM1023 หกหลักสุดท้าย 576098 คือ parity ด้วยโปรแกรมตารางคำนวณหรือโค้ดไม่กี่บรรทัด เราถอดรหัสได้ทั้งข้อความ และเป้าหมายของบทเรียนนี้คือการมองบรรทัดเลขฐานสิบหกแล้วพูดได้ว่า "เครื่องบินของ KLM กำลังประกาศเที่ยวบิน 1023"

parity คือส่วนที่ควรคิดให้ลึกที่สุด เหนือสนามบินที่พลุกพล่าน สัญญาณจากเครื่องบินหลายลำซ้อนทับกันที่เครื่องรับอยู่ตลอดเวลา และพัลส์บางลูกก็หายไปในสัญญาณรบกวน ตัวถอดรหัสจึงต้องประกอบบิตผิดออกมาบ้างอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ 24 บิตสุดท้ายคือการตรวจสอบความซ้ำซ้อนแบบวน (cyclic redundancy check) บิตข้อความ 88 บิตถูกมองเป็นเลขฐานสองยาว ๆ หนึ่งจำนวน แล้วนำไปหาร ในระบบเลขคณิตที่การลบคือ exclusive-or ด้วยพหุนามตัวสร้างขนาด 25 บิตที่กำหนดไว้ เศษที่เหลือคือ CRC เครื่องรับจะหารซ้ำกับบิตที่ตัวเองถอดรหัสได้ ถ้ามีบิตผิดเพียงบิตเดียว สองบิต หรือข้อผิดพลาดติดกันเป็นช่วงยาวไม่เกิน 24 บิต เศษจะเปลี่ยนไป และข้อความจะถูกปฏิเสธ ลองทำ CRC แบบ 4 บิตกับข้อความ 8 บิตด้วยมือเพื่อดูกลไก แล้วถ้าเขียนโปรแกรมเป็น ลองเขียน CRC-24 ของจริง แล้วตรวจว่าข้อความตัวอย่างผ่าน และถ้ากลับค่าบิตใดบิตหนึ่งก็จะไม่ผ่าน นี่คือการตรวจจับข้อผิดพลาดแบบที่ระบบสมัยใหม่ทุกระบบใช้ ในสถานการณ์ที่ข้อผิดพลาดที่หลุดรอดไปอาจทำให้เครื่องบินผีโผล่บนจอของผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศได้

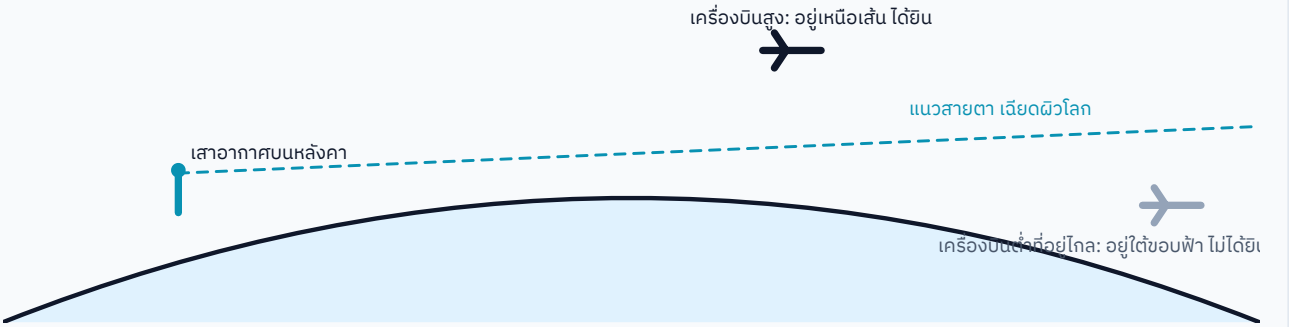
บทเรียนที่ 4

ระยะรับ: ความโค้งของโลกและกฎกำลังสองผกผัน

เครื่องรับจะได้ยินเครื่องบินได้ไกลแค่ไหน มีข้อจำกัดสองแบบที่ต่างกัน และควรแยกออกจากกันให้ชัด แบบแรกคือข้อจำกัดเชิงเรขาคณิต ที่ 1090 MHz คลื่นวิทยุไม่โค้งไปตามผิวโลก มันเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง เครื่องรับจึงได้ยินเฉพาะเครื่องบินที่อยู่เหนือขอบฟ้าของมัน คือเครื่องบินที่ลากเส้นตรงมาถึงเสาอากาศได้โดยไม่ชนพื้น ลองพิสูจน์ระยะขอบฟ้า ดู เสาอากาศที่สูง h เหนือทรงกลมรัศมี R จะเห็นขอบฟ้าตรงที่แนวสายตาสัมผัสทรงกลม เส้นสัมผัสกับรัศมีทั้งสองเส้นทำมุมฉากที่จุดสัมผัส ดังนั้น d^2 + R^2 = (R + h)^2 ซึ่งได้ d^2 = 2Rh + h^2 และเนื่องจาก h น้อยมากเมื่อเทียบกับ R จึงได้ d = sqrt(2Rh) เมื่อ R = 6 371 km และ h เป็นเมตร จะได้ d (km) = 3.57 sqrt(h) บรรยากาศทำให้คลื่นวิทยุโค้งลงเล็กน้อย เพราะดัชนีหักเหลดลงตามความสูง 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: 149 km เครื่องบินบนรันเวย์ห่างออกไป 30 km: 4.12 x (4.47 + 2) = 27 km จึงไม่ได้ยินเลย



ลองพล็อตกราฟ d กับ h2 สำหรับความสูงเสาอากาศของเราเอง กราฟจะชันในตอนแรกแล้วค่อย ๆ แบนลง และอธิบายรูปร่างพื้นที่รับสัญญาณของเครื่องรับทุกเครื่องได้ คือ 400 km ขึ้นไปสำหรับเครื่องบินที่บินระดับเดินทาง ไม่กี่สิบกิโลเมตรสำหรับเครื่องบินที่กำลังร่อนลงจอด และไม่ได้ยินอะไรบนพื้นเลยยกเว้นสนามบินที่อยู่ติดกัน มันอธิบายว่าทำไมความสูงจึงเป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดของเครื่องรับ และทำไมเนินเขา อาคาร หรือแม้แต่ปีกของเครื่องบินเองตอนเอียงเลี้ยวออกไป ก็ตัดเส้นทางการติดตามได้ทันที

ข้อจำกัดแบบที่สองคือพลังงาน ทรานสปอนเดอร์แผ่กำลังไม่กี่ร้อยวัตต์ ออกไปเท่า ๆ กันโดยประมาณในทุกทิศทางแนวราบ ที่ระยะ d กำลังนั้นกระจายไปบนทรงกลมที่มีพื้นที่ 4 pi d^2 กำลังที่เสาอากาศซึ่งมีพื้นที่ประสิทธิผลคงที่รับได้จึงลดลงตาม 1 / d^2 นี่คือกฎกำลังสองผกผัน ซึ่งเราควรพิสูจน์จากพื้นที่ของทรงกลม ไม่ใช่ท่องจำ ไกลขึ้นสองเท่า กำลังเหลือหนึ่งในสี่ ไกลขึ้นสิบเท่า เหลือหนึ่งในร้อย วิศวกรบอกการสูญเสียเป็นเดซิเบล โดย 10 dB คือกำลังต่างกันสิบเท่า และ 3 dB คือสองเท่า เพราะเดซิเบลเปลี่ยนการคูณที่ครอบคลุมหลายอันดับขนาดให้เป็นการบวก การสูญเสียตามเส้นทางในอวกาศว่างระหว่างเสาอากาศพื้นฐานสองต้นคือ:

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

ที่ 400 km และ 1090 MHz: 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

ตัวเลขนี้ควรหยุดคิดสักครู่ เครื่องรับบนหลังคากำลังตรวจจับสัญญาณที่อ่อนกว่าสัญญาณที่ออกจากเครื่องบิน 10^14.5 เท่า คือหนึ่งในล้านของหนึ่งในล้านวัตต์ เครื่องรับสำหรับงานอดิเรกที่ดีถอดรหัสได้ถึงประมาณ -100 dBm จึงยังเหลือเผื่ออีก 9 dB ที่ระยะ 400 km พูดอีกอย่างคือ ข้อจำกัดด้านพลังงานกับขอบฟ้าเชิงเรขาคณิตสำหรับเครื่องบินโดยสารที่บินระดับเดินทางตกอยู่ที่จุดเดียวกัน และนั่นเป็นความตั้งใจของการออกแบบ กำลังส่งของทรานสปอนเดอร์และมาตรฐานของเครื่องรับถูกกำหนดให้ได้ยินเครื่องบินได้ถึงขอบฟ้าของมันและไม่ไกลกว่านั้นมาก ซึ่งช่วยไม่ให้ช่องสัญญาณล้นไปด้วยการจราจรจากประเทศข้างเคียง

มีรายละเอียดเพิ่มเติมอีกสองข้อ ข้อแรกคือดอปเพลอร์ เครื่องบินที่เข้าใกล้ด้วยความเร็ว 250 m/s ทำให้ความถี่ที่รับได้เลื่อนไป f v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz ไม่ถึงหนึ่งในล้านส่วน ซึ่งเครื่องรับไม่มีทางสังเกตเห็น ลองเทียบกับเสียงของเครื่องบินลำเดียวกัน ซึ่ง v / c คือ 250 / 343 และระดับเสียงจะต่ำลงเกือบหนึ่งช่วงคู่แปดขณะที่มัน

บินผ่าน ข้อสองคือเวลาเดินทางของสัญญาณ 400 km ด้วยความเร็ว c ใช้เวลา 1.33 ms ตำแหน่งที่ส่งมาจึงเก่าไปแล้ว 1.33 ms ตอนที่มาถึง ซึ่งระหว่างนั้นเครื่องบินเคลื่อนที่ไป 33 cm ไม่มีผลอะไรสำหรับแผนที่ แต่เป็นตัวชี้ขาดสำหรับมัลติเลเทอเรชัน ซึ่งอาศัยไมโครวินาทีเหล่านี้โดยตรง

บทเรียนที่ 5

เสาอากาศและเครื่องรับ: จากคลื่นยาว 27 เซนติเมตร สู่จุดบนแผนที่

เสาอากาศคือตัวนำที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งผ่านมาเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสสลับ และอุปกรณ์ชิ้นเดียวกันนี้ถ้าป้อนกระแสเข้าไปก็จะปล่อยคลื่นออกมา เสาอากาศรับและเสาอากาศส่งจึงเป็นสิ่งเดียวกันที่ทำงานกลับทิศ กระแสเหนี่ยวนำจะมากที่สุดเมื่อเกิดการสั่นพ้อง คือเมื่อความยาวของตัวนำทำให้การกระจายของกระแสตามตัวนำเข้ากับการสั่นของคลื่นพอดี เหมือนสายที่ยาวพอเหมาะจะสั่นพ้องกับโน้ตเสียงหนึ่ง ตัวนำตรงมีการสั่นพ้องพื้นฐานที่ครึ่งความยาวคลื่น คือ 13.75 cm ที่ 1090 MHz โดยกระแสมากที่สุดตรงกลางและเป็นศูนย์ที่ปลายทั้งสองข้าง เสาอากาศ ADS-B ที่ใช้จริง ทั้งบนเครื่องบินและบนเครื่องรับส่วนใหญ่ คือโมโนโพลหนึ่งในสี่ความยาวคลื่น เป็นแท่งตั้งยาว 6.9 cm บนระนาบกราวด์ที่นำไฟฟ้า ซึ่งสะท้อนภาพของแท่งนั้น ทำให้แท่งกับภาพสะท้อนรวมกันเป็นไดโพลครึ่งความยาวคลื่น บนเครื่องบิน ลำตัวเครื่องคือระนาบกราวด์ ส่วนเสาอากาศ 1090 MHz ที่ซื้อมาก็ซ่อนรูปทรงเรขาคณิตแบบเดียวกันไว้ในท่อ ซ้อนกันหลายชั้น เสาอากาศที่ทำเองจะคลาดการปรับจูนเพราะความผิดพลาดเพียงไม่กี่มิลลิเมตร และได้ยินท้องฟ้าเพียงส่วนน้อย นี่คือเหตุผลที่เครื่องรับในโครงงานใช้เสาอากาศที่ปรับจูนมาจากโรงงาน

โมโนโพลแนวดิ่งไวที่สุดในทิศทางขอบฟ้า และไม่ไวเลยในแนวแกนของตัวเอง ความไวในสามมิติของมันจึงเป็นรูปโดนัท โดยมีเสาอากาศเสียบอยู่ตรงรูกลาง ดังนั้นเครื่องรับของเราจะได้ยินเครื่องบินที่อยู่ห่างออกไป 300 km ได้ชัดเจน แต่จะหลุดเครื่องบินที่บินผ่านเหนือศีรษะพอดีไปสองสามวินาที และเราดูปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้จริง เสาอากาศแบบคอลลิเนียร์ (collinear) ซึ่งมีส่วนที่สั่นพ้องหลายชิ้นซ้อนกัน จะทำให้โดนัทแบนลงและเพิ่มความไวที่ขอบฟ้า โดยแลกกับรูเหนือศีรษะ นี่คืออัตราขยายของเสาอากาศ (antenna gain) วัดเป็น dBi และมันมาจากการกระจายความไวใหม่ ไม่ใช่การสร้างความไวขึ้นมา และจากบทเรียนที่ 1 เสาอากาศต้องตั้งในแนวดิ่ง เพราะคลื่นมีโพลาไรเซชันแนวดิ่ง

ระหว่างเสาอากาศกับจุดบนแผนที่มีสี่ขั้นตอน ตัวกรองแถบผ่าน (band-pass filter) ปล่อยให้ 1090 MHz ผ่าน และกันสัญญาณโทรศัพท์มือถือที่แรงกว่ามากซึ่งอยู่ห่างออกไปไม่กี่ร้อยเมกะเฮิรตซ์ ซึ่งถ้าไม่กันไว้จะทำให้ทุกอย่างหลังจากนั้นอิ่มตัว เครื่องขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (low-noise amplifier) ที่เสาอากาศขยายสัญญาณขึ้นพันเท่าก่อนเข้าสายเคเบิล ซึ่งที่ 1090 MHz สูญเสียประมาณ 3 dB หรือครึ่งหนึ่งของสัญญาณทุก ๆ สิบเมตร ถ้าขยายหลังสายเคเบิล เราก็จะขยายสัญญาณรบกวนของสายเคเบิลไปด้วย วิทยุที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (software-defined radio) อุปกรณ์ USB ราคา 20 ยูโรที่แต่เดิมขายเป็นจูนเนอร์ทีวี จะแปลงความถี่สัญญาณลงมาแล้วสุ่มตัวอย่างสองล้านครั้งต่อวินาทีออกมาเป็นสายตัวเลข จากตรงนี้ไปเป็นเรื่องการเขียนโปรแกรม ซอฟต์แวร์ฟรีจะสแกนหาส่วนนำในตัวอย่างเหล่านั้น วัดว่าครึ่งไหนของแต่ละช่องไมโครวินาทีมีพลังงานมากกว่า ประกอบเป็น 112 บิต คำนวณ CRC และถ้าผ่านก็ถอดรหัสช่องข้อมูลต่าง ๆ จากนั้นโปรแกรมติดตามจะจับคู่เฟรมตำแหน่งคู่กับคี่ รวมตำแหน่ง ความเร็ว และรหัสประจำตัวเข้าด้วยกันตามที่อยู่ ICAO และเก็บสถานะของเครื่องบินแต่ละลำไว้จนกว่าข้อความจะหยุดมา ซึ่งมักเป็นเพราะเครื่องบินลงไปต่ำกว่าขอบฟ้าแล้ว

ลองวาดห่วงโซ่นั้นออกมา พร้อมปริมาณในแต่ละขั้น ได้แก่ นาโนโวลต์ที่เสาอากาศ ไมโครโวลต์หลังเครื่องขยาย สองล้านตัวอย่างต่อวินาทีที่ออกจากวิทยุ ไม่กี่ร้อยเฟรมต่อวินาทีที่ออกจากตัวถอดรหัส และหนึ่งระเบียนต่อเครื่องบินหนึ่งลำที่ออกจากโปรแกรมติดตาม จุดบนแผนที่คือปลายสุดของห่วงโซ่ที่ทุกข้อต่อคือแนวคิดจากบทเรียนนี้ ได้แก่ การสั่นพ้อง การกรอง การขยาย การสุ่มตัวอย่าง การจับคู่รูปแบบ การถอดรหัส การตรวจข้อผิดพลาด และการรวบรวมข้อมูล โครง

งานคือการสร้างห่วงโซ่นี้แล้วทดสอบบทเรียนกับท้องฟ้าจริง วัดระยะรับสูงสุดเทียบกับความสูงแล้วเปรียบเทียบกับสูตรขอบฟ้า เปรียบเทียบเสาอากาศในห้อง ที่หน้าต่าง และบนหลังคา ทั้งแนวดิ่งและแนวนอน บันทึกการจราจรทางอากาศหนึ่งวันแล้วหาชั่วโมงที่พลุกพล่านที่สุดและความสูงระดับเดินทางที่พบบ่อย ถอดรหัสข้อความดิบแล้วตรวจ CRC ด้วยโค้ดของเราเอง แล้วจากนั้นลองตั้งคำถามที่ระบบนี้ทำให้เกิดขึ้นแต่ไม่ได้ตอบ ข้อความเหล่านี้ไม่มีลายเซ็นดิจิทัล แล้วอะไรจะห้ามไม่ให้ใครบางคนส่งเครื่องบินผีออกมา เครื่องบินพึ่งพาดาวเทียมที่ถูกรบกวนสัญญาณได้ แล้วผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศจะเห็นอะไรเมื่อเกิดเหตุนั้น และข้อมูลนี้ระบุตัวเครื่องบินได้ ซึ่งอาจระบุตัวคนได้ด้วย แล้วใครควรติดตามใครได้บ้าง

โจทย์ท้าทาย

ลองคิดแต่ละข้อบนกระดาษก่อน ส่วนเฉลยจะแสดงคำตอบและเหตุผล

1. **1. สัญญาณ 1090 MHz มีความยาวคลื่นเท่าไร และเสาอากาศหนึ่งในสี่ความยาวคลื่นสำหรับสัญญาณนี้ยาวเท่าไร**

2. **2. ข้อความเร็วกว่าเสียงกี่เท่า เครื่องบินที่อยู่ห่างออกไป 30 km ปล่อยทั้งสองอย่างออกมาพร้อมกัน เมื่อเสียงมาถึง เครื่องบินบินไปได้ไกลเท่าไรแล้ว**

3. **3. นาฬิกาของเครื่องรับคลาดไป 2 ไมโครวินาที จะทำให้ระยะคลาดเคลื่อนเท่าไร และทำไมเครื่องรับดาวเทียมจึงต้องใช้ดาวเทียมสี่ดวงแทนที่จะเป็นสามดวง**

4. **4. ที่อยู่ขนาด 24 บิตระบุเครื่องบินได้กี่ลำ ข้อความ 112 บิตที่อัตรา 1 บิตต่อไมโครวินาทีใช้เวลานานเท่าไร และถ้ารวมส่วนนำด้วยใช้เวลาทั้งหมดเท่าไร**

5. **5. ในข้อความ 8D4840D6… downlink format และ capability คืออะไร และที่อยู่ ICAO คืออะไร**

6. **6. เสาอากาศรับอยู่สูง 15 m ขอบฟ้าวิทยุถึงเครื่องบินที่ 9 000 m อยู่ไกลเท่าไร และถึงเครื่องบินที่ 300 m ล่ะ**

7. **7. ทำไมระยะทางที่เพิ่มขึ้นสองเท่าจึงทำให้กำลังที่รับได้เหลือหนึ่งในสี่ การสูญเสียตามเส้นทางที่ 200 km เป็นเท่าไร และเทียบกับ 145 dB ที่ 400 km แล้วเป็นอย่างไร**

8. **8. ทำนายว่าระยะรับจะเป็นอย่างไรถ้าวางเสาอากาศในแนวนอน และถ้าย้ายเครื่องรับจากหลังคาลงมาชั้นล่าง**

ต่อไป

ลงมือสร้าง

ทุกอย่างในบทเรียนเหล่านี้ตรวจสอบได้จากหน้าต่างบ้าน เวิร์กช็อปภาคปฏิบัติจะให้รายการของที่ต้องซื้อ (ประมาณ 100 ถึง 150 ยูโร หรือใช้ Raspberry Pi ที่มีอยู่แล้ว) เสาอากาศที่ควรเลือกและที่ที่ควรติดตั้ง คำสั่งสามคำสั่งที่ติดตั้งฟีดเดอร์ของ Dataero และการวัดที่ทดสอบสูตรต่าง ๆ กับเครื่องบินจริง ได้แก่ ขอบฟ้าวิทยุ กฎกำลังสองผกผัน และจังหวะ

ของการจราจรในแต่ละวัน เมื่อเครื่องรับของเราส่งข้อมูลขึ้นแผนที่ เครื่องบินทุกลำที่มันได้ยินจะถูกวาดให้ทุกคนเห็น พร้อมชื่อสถานีของเรา

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

เฉลย

1. 1. สัญญาณ 1090 MHz มีความยาวคลื่นเท่าไร และเสาอากาศหนึ่งในสี่ความยาวคลื่นสำหรับสัญญาณนี้ยาวเท่าไร
   lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m ส่วนที่ยาวหนึ่งในสี่ความยาวคลื่นคือ 6.9 cm ความเร็วแสงที่คงที่บังคับให้ความถี่กับความยาวคลื่นแปรผกผันกัน
2. 2. ข้อความเร็วกว่าเสียงกี่เท่า เครื่องบินที่อยู่ห่างออกไป 30 km ปล่อยทั้งสองอย่างออกมาพร้อมกัน เมื่อเสียงมาถึง เครื่องบินบินไปได้ไกลเท่าไรแล้ว
   3.00 x 10^8 / 343 = ประมาณ 875 000 เท่า ข้อความมาถึงใน 100 ไมโครวินาที เสียงมาถึงใน 87 s ซึ่งระหว่างนั้นเครื่องบินที่บินด้วยความเร็ว 250 m/s บินไปได้ 22 km
3. 3. นาฬิกาของเครื่องรับคลาดไป 2 ไมโครวินาที จะทำให้ระยะคลาดเคลื่อนเท่าไร และทำไมเครื่องรับดาวเทียมจึงต้องใช้ดาวเทียมสี่ดวงแทนที่จะเป็นสามดวง
   2 x 10^-6 s x 3 x 10^8 m/s = 600 m ดาวเทียมสามดวงหาค่า x, y และ z ได้ก็ต่อเมื่อนาฬิกาสมบูรณ์แบบ ค่าชดเชยนาฬิกาเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าตัวที่สี่ จึงต้องใช้ดาวเทียมดวงที่สี่
4. 4. ที่อยู่ขนาด 24 บิตระบุเครื่องบินได้กี่ลำ ข้อความ 112 บิตที่อัตรา 1 บิตต่อไมโครวินาทีใช้เวลานานเท่าไร และถ้ารวมส่วนนำด้วยใช้เวลาทั้งหมดเท่าไร
   2^24 = 16 777 216 ข้อมูลใช้เวลา 112 ไมโครวินาที รวมส่วนนำ 8 ไมโครวินาทีเป็น 120 ไมโครวินาที
5. 5. ในข้อความ 8D4840D6... downlink format และ capability คืออะไร และที่อยู่ ICAO คืออะไร
   8D = 1000 1101 ห้าบิตแรก 10001 = 17: DF 17 คือ ADS-B จากทรานสปอนเดอร์ Mode S สามบิตถัดไป 101 = 5: CA 5 ที่อยู่ ICAO คือ 4840D6 ซึ่งจัดสรรให้เนเธอร์แลนด์
6. 6. เสาอากาศรับอยู่สูง 15 m ขอบฟ้าวิทยุถึงเครื่องบินที่ 9 000 m อยู่ไกลเท่าไร และถึงเครื่องบินที่ 300 m ล่ะ
   d = 4.12 x (sqrt(15) + sqrt(9000)) = 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km สำหรับ 300 m: 4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km
7. 7. ทำไมระยะทางที่เพิ่มขึ้นสองเท่าจึงทำให้กำลังที่รับได้เหลือหนึ่งในสี่ การสูญเสียตามเส้นทางที่ 200 km เป็นเท่าไร และเทียบกับ 145 dB ที่ 400 km แล้วเป็นอย่างไร
   กำลังที่ส่งออกไปกระจายบนทรงกลมที่มีพื้นที่ 4 pi d^2 ซึ่งใหญ่ขึ้นสี่เท่าเมื่อระยะทางเพิ่มเป็นสองเท่า ที่ 200 km: 20 log10(200) + 20 log10(1090) + 32.44 = 46.0 + 60.7 + 32.4 = 139 dB น้อยกว่าที่ 400 km อยู่ 6 dB (สี่เท่า)
8. 8. ทำนายว่าระยะรับจะเป็นอย่างไรถ้าวางเสาอากาศในแนวนอน และถ้าย้ายเครื่องรับจากหลังคาลงมาชั้นล่าง
   แนวนอน: เสาอากาศมีโพลาไรเซชันตั้งฉากกับคลื่นแนวดิ่ง กระแสเหนี่ยวนำขึ้นกับองค์ประกอบของสนามที่อยู่ตามแนวตัวนำ จึงได้ยินน้อยมาก ชั้นล่าง: ค่าขอบฟ้า 4.12 sqrt(h1) ลดลง และอาคารบังแนวสายตา ระยะรับจึงลดลงมาก โดยเฉพาะกับเครื่องบินที่บินต่ำ