หลักสูตรอ้างอิง - สำหรับผู้ใหญ่ทุกคน

ADS-B คืออะไรและทำงานอย่างไร

สิบสองบท ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ด้านการบินหรือวิทยุมาก่อน คณิตศาสตร์ระดับมัธยมก็เพียงพอสำหรับตัวอย่างการคำนวณ และสามารถข้ามตัวอย่างเหล่านั้นได้โดยไม่หลุดจากเนื้อเรื่อง ใช้เวลาอ่านประมาณ 50 นาที

เรียนรู้ - https://radar.dataero.eu/th/learning/course 2026-11-21

สารบัญ

บทที่ 1 ปัญหา: ท้องฟ้าที่เต็มไปด้วยอากาศยานซึ่งไม่มีใครมองเห็น
บทที่ 2 ก่อนยุค ADS-B: การค้นหาอากาศยานด้วยเรดาร์
บทที่ 3 แนวคิด: ให้อากาศยานบอกเราเอง
บทที่ 4 อากาศยานรู้ได้อย่างไรว่าตัวเองอยู่ที่ไหน
บทที่ 5 โครงสร้างของข้อความ
บทที่ 6 - ฟิสิกส์ คลื่น: วิทยุในฐานะแสงที่มองไม่เห็น
บทที่ 7 - ฟิสิกส์ ระยะ: ความโค้งของโลกและการจางลงของสัญญาณ
บทที่ 8 - ฟิสิกส์ สายอากาศ: การจับคลื่นยาว 27 เซนติเมตร
บทที่ 9 การรับและการถอดรหัส
บทที่ 10 จากเครื่องรับเครื่องเดียวสู่แผนที่ทั้งทวีป
บทที่ 11 ใช้ทำอะไร และมีข้อบกพร่องตรงไหน
บทที่ 12 ประวัติโดยย่อ
อภิธานศัพท์
ถัดไป จากทฤษฎีสู่การปฏิบัติ: สร้างเครื่องรับ

บทที่ 1

ปัญหา: ท้องฟ้าที่เต็มไปด้วยอากาศยานซึ่งไม่มีใครมองเห็น

ในวันธรรมดาทั่วไป มีเที่ยวบินประมาณ 30,000 เที่ยวบินผ่านห้วงอากาศของยุโรป เครื่องบินโดยสารที่ระดับเดินทางเคลื่อนที่ด้วยความเร็วราว 250 เมตรต่อวินาที หรือ 900 km/h อากาศยานสองลำที่มุ่งหน้าเข้าหากันจะเข้าใกล้กันครึ่งกิโลเมตรในทุกวินาที นักบินที่มองออกไปนอกหน้าต่างแทบไม่เห็นสิ่งเหล่านี้เลย: ที่ความสูง 10,000 เมตร อากาศยานลำอื่นเป็นเพียงจุดเล็ก ๆ และเมฆก็บดบังส่วนใหญ่ไว้อยู่แล้ว ท้องฟ้าคือเครือข่ายถนนสามมิติที่ไม่มีถนนวาดไว้ และการจราจรบนนั้นทั้งรวดเร็วและมองไม่เห็น

การควบคุมจราจรทางอากาศมีไว้เพื่อแยกการจราจรนั้นออกจากกัน กฎโดยหลักการนั้นเรียบง่าย: ในห้วงอากาศควบคุม อากาศยานจะถูกรักษาระยะห่างในแนวดิ่งอย่างน้อย 1,000 ฟุต (ประมาณ 300 เมตร) หรือระยะห่างในแนวราบตามที่กำหนด โดยทั่วไปคือ 5 ไมล์ทะเล (9.3 km) ในพื้นที่ที่มีเรดาร์ครอบคลุม และมากกว่านั้นมากเหนือมหาสมุทร เพื่อใช้กฎเหล่านี้ เจ้าหน้าที่ควบคุมการจราจรทางอากาศต้องรู้ตำแหน่งของอากาศยานทุกลำในเขตความรับผิดชอบอย่างต่อเนื่องและเชื่อถือได้: ไม่ใช่ว่ามันอยู่ที่ไหนเมื่อหนึ่งนาทีก่อน แต่อยู่ที่ไหนในขณะนี้ สูงเท่าไร และกำลังมุ่งไปทางใด หัวข้อทั้งหมดของหลักสูตรนี้คือความรู้นั้นได้มาอย่างไร คำศัพท์ทางเทคนิคของสิ่งนี้คือ **การเฝ้าระวัง (surveillance)**

ตัวเลขที่ควรจำไว้
ที่ความเร็ว 900 km/h อากาศยานเดินทางได้ 15 km ในหนึ่งนาที และ 250 m ในหนึ่งวินาที วิธีการเฝ้าระวังใดก็ตามที่อัปเดตช้า หรือมีความคลาดเคลื่อนมาก จะทำให้เจ้าหน้าที่ควบคุมต้องคาดเดาในระยะทางที่สำคัญที่สุดพอดี

บทที่ 2

ก่อนยุค ADS-B: การค้นหาอากาศยานด้วยเรดาร์

คำตอบแรกซึ่งพัฒนาขึ้นในช่วงปลายทศวรรษ 1930 และเติบโตเต็มที่ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง คือ **เรดาร์ปฐมภูมิ (primary radar)** สายอากาศขนาดใหญ่ที่หมุนได้จะส่งพัลส์พลังงานวิทยุที่สั้นและทรงพลังมากออกไป เมื่อพัลส์กระทบอากาศยาน ส่วนเล็กน้อยของมันจะสะท้อนกลับมา เรดาร์วัดเวลาระหว่างที่พัลส์ออกไปกับที่เสียงสะท้อนกลับมา เนื่องจากวิทยุเดินทางด้วยความเร็วแสง 300,000 km/s เวลาจึงบอกระยะทาง ทิศที่สายอากาศชี้อยู่บอกมุมทิศ เรดาร์ปฐมภูมิเป็นอิสระอย่างน่าทึ่ง: อากาศยานไม่ต้องมีอุปกรณ์ใดเลย ซึ่งเป็นเหตุผลที่ฝ่ายทหารยังคงใช้อยู่ แต่มันก็มีจุดอ่อนจริง ๆ เสียงสะท้อนจากอากาศยานที่อยู่ไกลนั้นอ่อนมากเป็นพิเศษ เครื่องส่งจึงต้องมีขนาดมหึมา เสียงสะท้อนไม่ได้บอกอะไรเลยว่าอากาศยานลำนั้นคือใครหรือสูงเท่าไร และสายอากาศใช้เวลาหลายวินาทีกว่าจะหมุนครบรอบ อากาศยานแต่ละลำจึงถูกมองเห็นเพียงครั้งเดียวทุก 4 ถึง 12 วินาที ซึ่งระหว่างนั้นมันเคลื่อนที่ไปได้ถึง 3 km

คำตอบที่สองคือ **เรดาร์เฝ้าระวังทุติยภูมิ (secondary surveillance radar)** (SSR) ซึ่งทำให้อากาศยานกลายเป็นผู้มีส่วนร่วม สถานีภาคพื้นดินส่งคำถาม หรือ *การสอบถาม (interrogation)* ที่ความถี่ 1030 MHz วิทยุขนาดเล็กบนอากาศยานที่เรียกว่า **ทรานสปอนเดอร์ (transponder)** ได้ยินคำถามแล้วตอบกลับที่ความถี่ 1090 MHz ด้วยสัญญาณที่แรงของตัวเอง เนื่องจากคำตอบถูกส่งออกมาแทนที่จะเป็นการสะท้อน มันจึงแรงกว่าเสียงสะท้อนเรดาร์หลายล้านเท่า และเนื่องจากมันถูกสร้างขึ้นโดยคอมพิวเตอร์ มันจึงบรรจุข้อมูลได้ ในรูปแบบที่เก่าแก่ที่สุด (Mode A) คำตอบมีรหัสระบุตัวสี่หลักที่เจ้าหน้าที่ควบคุมกำหนดให้ ใน Mode C ยังมีความสูงของอากาศยานด้วย ในทศวรรษ 1980 มี **Mode S** เกิดขึ้น ("S" ย่อมาจาก selective หรือแบบเลือกได้) ซึ่งทรานสปอนเดอร์ทุกเครื่องมีที่อยู่ 24 บิตที่ไม่ซ้ำกัน สามารถถูกสอบถามเป็นรายเครื่อง และตอบกลับด้วยข้อความข้อมูลขนาด 56 หรือ 112 บิตได้ จำตัวเลข 1090 MHz และคำว่า Mode S ไว้ให้ดี: ADS-B สร้างขึ้นบนทั้งสองสิ่งนี้โดยตรง

เรดาร์ทุติยภูมิเป็นการพัฒนาที่ยิ่งใหญ่ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดสองประการเหมือนรุ่นก่อน อากาศยานพูดเฉพาะเมื่อถูกถามภาคพื้นดินจึงยังต้องมีสถานีสอบถามอยู่ในระยะ ซึ่งตัดมหาสมุทร ทะเลทราย และเทือกเขาออกไป และสถานียังต้องใช้สายอากาศหมุนเพื่อรู้ว่าคำตอบมาจากทิศใด อากาศยานแต่ละลำจึงยังถูกมองเห็นเพียงครั้งเดียวต่อรอบการหมุน และหน้าจอของเจ้าหน้าที่ควบคุมยังคงแสดงจุดที่กระโดดทุก ๆ ไม่กี่วินาที แทนที่จะเป็นอากาศยานที่เคลื่อนที่อย่างราบรื่น การจะพัฒนาให้ดีกว่านั้นต้องอาศัยสิ่งที่แตกต่างโดยพื้นฐาน: วิธีที่อากาศยานรายงานตำแหน่งของตัวเองได้โดยไม่ต้องถูกถาม และโดยที่ภาคพื้นดินไม่ต้องวัดอะไรเลย

บทที่ 3

แนวคิด: ให้อากาศยานบอกเราเอง

ภายในทศวรรษ 1990 มีเทคโนโลยีสองอย่างที่เติบโตเต็มที่จนทำให้แนวทางที่ต่างออกไปเป็นไปได้ การนำทางด้วยดาวเทียมทำให้อากาศยานทุกลำที่ติดตั้งอุปกรณ์เหมาะสมรู้ตำแหน่งของตัวเองได้อย่างแม่นยำ ดีกว่าที่เรดาร์ใด ๆ จะวัดได้จากภาคพื้นดินมาก และทรานสปอนเดอร์ Mode S ก็มีวิทยุที่ส่งข้อความข้อมูลบนความถี่ 1090 MHz ได้อยู่แล้ว นำทั้งสองอย่างมารวมกัน ตรรกะก็ชัดเจนจนยากจะปฏิเสธ: แทนที่ภาคพื้นดินจะพยายามวัดว่าอากาศยานอยู่ที่ไหน ก็ให้อากาศยานซึ่งรู้อยู่แล้วบอกออกมาเองเป็นระยะ ๆ ให้ทุกคนรู้ นั่นคือ ADS-B และคำทั้งสี่คำในชื่อของมันก็อธิบายได้อย่างแม่นยำ

มันเป็นแบบ **อัตโนมัติ (automatic)**: ไม่มีสิ่งใดกระตุ้นการส่งสัญญาณ ทรานสปอนเดอร์ส่งตามกำหนดเวลาของตัวเอง ประมาณวินาทีละสองครั้ง ไม่ว่าจะมีสถานีภาคพื้นดินอยู่ในระยะหรือไม่ และไม่ว่านักบินจะทำอะไรหรือไม่ อันที่จริงนักบินไม่สามารถหยุดมันระหว่างบินได้ เว้นแต่จะปิดทรานสปอนเดอร์ ซึ่งเป็นสิ่งต้องห้าม มันเป็นแบบ **พึ่งพา (dependent)**:

ทุกรายการในข้อความมาจากอุปกรณ์ของอากาศยานเอง ตำแหน่งมาจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม และความสูงมาจากมาตรวัดความสูงด้วยความกดอากาศ ภาคพื้นดินไม่ได้วัดอะไรเลย มันเชื่อในสิ่งที่ได้รับแจ้ง มันคือ **การเฝ้าระวัง (surveillance)**: จุดประสงค์คือให้ผู้อื่นรู้ว่าอากาศยานอยู่ที่ไหน ทั้งสำหรับการควบคุมจราจรทางอากาศและอากาศยานที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งต่างจากการนำทาง (navigation) ที่อากาศยานรู้ว่าตัวเองอยู่ที่ไหน และต่างจากการสื่อสาร (communication) ที่เป็นการพูดคุยกับนักบิน และมันคือ **การกระจายสัญญาณ (broadcast)**: ข้อความไม่มีผู้รับที่ระบุ ไม่มีการตอบรับ และไม่มีการเข้ารหัส ทุกคนที่มีเครื่องรับอยู่ในระยะจะได้ยินสิ่งเดียวกันทุกประการ ไม่ว่าจะเป็นศูนย์ควบคุม เครื่องบินโดยสารลำอื่น หรือโรงเรียน

"พึ่งพา" คือคำที่ทำให้วิศวกรกังวล และเป็นคำที่คุ้มค่าที่สุดที่จะอธิบาย เรดาร์ทำการวัดอย่างเป็นอิสระ: หากเครื่องวัดของอากาศยานผิดพลาด เรดาร์ก็ไม่ได้รับผลกระทบ ADS-B รับความคลาดเคลื่อนทุกอย่างของระบบนำทางของอากาศยานมาด้วย และหากระบบนั้นถูกหลอกหรือขัดข้อง ตำแหน่งที่กระจายออกไปก็จะผิดด้วยความมั่นใจเท่าเดิม นี่คือเหตุผลที่ข้อความ ADS-B ทุกข้อความมีข้อมูลบอกว่าอากาศยานเชื่อถือตำแหน่งของตัวเองมากเพียงใด ควบคู่ไปกับตำแหน่ง (หมวดความสมบูรณ์ (integrity) และความแม่นยำซึ่งเราจะพบในบทที่ 5) และเป็นเหตุผลที่เรดาร์ยังไม่ถูกปิด

"การกระจายสัญญาณ" คือคำที่ทำให้หลักสูตรนี้เป็นไปได้ เนื่องจากข้อความถูกส่งโดยไม่เข้ารหัสให้ทุกคน จึงไม่ได้มีเพียงการควบคุมจราจรทางอากาศที่ได้ยิน แต่เครื่องรับใดก็ตามที่ปรับไว้ที่ 1090 MHz ก็ได้ยินด้วย รวมถึงเครื่องที่คุณอาจติดตั้งบนหลังคาโรงเรียน คุณสมบัติเดียวกันนี้เป็นที่มาของข้อจำกัดหลักของระบบ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 11: ข้อความที่ใครก็อ่านได้ ก็เป็นข้อความที่ใครก็ปลอมแปลงได้เช่นกัน

บทที่ 4

อากาศยานรู้ได้อย่างไรว่าตัวเองอยู่ที่ไหน

ทุกสิ่งใน ADS-B ขึ้นอยู่กับการที่อากาศยานรู้ตำแหน่งของตัวเอง บทนี้จึงว่าด้วยการนำทางด้วยดาวเทียม คำเรียกทั่วไปคือ **GNSS** หรือ Global Navigation Satellite System (ระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก) GPS ของสหรัฐอเมริกาเป็นที่รู้จักมากที่สุด ส่วน Galileo ของยุโรป GLONASS ของรัสเซีย และ BeiDou ของจีนทำงานบนหลักการเดียวกัน แต่ละระบบเป็นกลุ่มดาวเทียมประมาณ 24 ถึง 30 ดวง โคจรที่ความสูงราว 20,000 km สูงเหนืออากาศยานไปมาก แต่ละดวงมีนาฬิกาอะตอมที่แม่นยำถึงระดับไม่กี่ส่วนในพันล้านวินาที ดาวเทียมแต่ละดวงส่งสัญญาณวิทยุอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยสาระแล้วบอกว่า "นี่คือดาวเทียมหมายเลข N ตำแหน่งของฉันคือเท่านั้นเท่านี้ และเวลาที่ฉันส่งสัญญาณนี้คือ T พอดี"

เครื่องรับบนอากาศยานได้ยินสัญญาณนั้นช้ากว่าเล็กน้อย เพราะวิทยุต้องใช้เวลาเดินทาง: ที่ 300,000 km/s ระยะ 20,000 km จากดาวเทียมใช้เวลาประมาณ 67 ในพันวินาที เครื่องรับเปรียบเทียบเวลาที่ประทับไว้ในข้อความกับเวลาที่สัญญาณมาถึง ผลต่างคูณด้วยความเร็วแสงคือระยะทางถึงดาวเทียมดวงนั้น ระยะทางหนึ่งค่าระบุว่าเครื่องรับอยู่ที่ใดที่หนึ่งบนทรงกลมรอบดาวเทียมดวงนั้น ทรงกลมสองลูกตัดกันเป็นวงกลม ทรงกลมสามลูกตัดกันที่สองจุด ซึ่งจุดหนึ่งมักเป็นไปไม่ได้ (ลึกลงไปใต้ดินหรือไกลออกไปในอวกาศ) และถูกตัดทิ้ง ดังนั้นดาวเทียมสามดวงก็น่าจะเพียงพอ หากเครื่องรับมีนาฬิกาที่สมบูรณ์แบบ

แต่มันไม่มี นาฬิกาอะตอมมีราคาหลายหมื่นยูโรและไม่สามารถใส่ลงไปได้ เครื่องรับมีนาฬิกาควอตซ์ราคาถูกที่อาจคลาดเคลื่อนมากกว่าความแม่นยำของการจับเวลาที่ต้องการอยู่มาก นี่คือส่วนที่งดงาม เครื่องรับถือว่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาตัวเองเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าตัวที่สี่ นอกเหนือจากพิกัดตำแหน่งสามค่า แล้วรับฟังดาวเทียมดวงที่สี่ สมการสี่สมการ ตัวแปรไม่ทราบค่าสี่ตัว: เครื่องรับแก้สมการหาตำแหน่งของตัวเอง และได้ผลพลอยได้คือแก้ไขนาฬิกาของตัวเองจนแม่นยำในระดับไม่กี่สิบนาโนวินาที นี่คือเหตุผลที่เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมต้องมองเห็นดาวเทียมอย่างน้อยสี่ดวง และเป็นเหตุผลที่เครื่องรับ GNSS ทุกเครื่องยังเป็นนาฬิกาที่แม่นยำที่สุดเครื่องหนึ่งในอาคารโดยบังเอิญด้วย

ขนาดของตัวเลขเหล่านี้ควรค่าแก่การพิจารณา เพราะมันอธิบายว่าทำไมการนำทางด้วยดาวเทียมแท้จริงแล้วเป็นงานรักษาเวลา โดยมีเรขาคณิตเป็นเรื่องรอง แสงเดินทางได้ 30 เซนติเมตรในหนึ่งนาโนวินาที และ 300 เมตรในหนึ่งไมโครวินาที ดังนั้นความคลาดเคลื่อนของเวลาหนึ่งในล้านวินาทีจะกลายเป็นความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง 300 เมตร และความแม่นยำระดับไม่กี่เมตรของเครื่องรับสมัยใหม่ก็สอดคล้องกับการจับเวลาในระดับประมาณสิบนาโนวินาที ลองดูกรณีที่เป็นรูปธรรม ดาวเทียมประทับเวลาบนสัญญาณว่า 12:00:00.000 000 000 เครื่องรับของอากาศยานได้ยินสัญญาณนั้นเวลา 12:00:00.070 000 000 เวลาเดินทางคือ 0.070 s ระยะทางจึงเป็น 0.070 x 300,000 km/s = 21,000 km หากนาฬิกาของเครื่องรับเดินเร็วไปเพียงหนึ่งไมโครวินาที มันจะคำนวณได้ 21,000.3 km ไกลเกินไป 300 เมตร และความคลาดเคลื่อนเดียวกันนี้ก็จะแทรกเข้าไปในระยะทางถึงดาวเทียมดวงอื่นทุกดวงด้วย ความคลาดเคลื่อนร่วมนี้เองคือสิ่งที่ดาวเทียมดวงที่สี่เปิดเผยและขจัดออกไป

ความสูงสองค่า ไม่ใช่ค่าเดียว

ดาวเทียมให้ความสูงเหนือพื้นผิวทางคณิตศาสตร์ของโลก ซึ่งเป็นความสูง*เชิงเรขาคณิต* แต่ความสูงที่อากาศยานกระจายออกไปเพื่อวัตถุประสงค์ด้านการจราจรทางอากาศไม่ใช่ค่านั้น มันคือ **ความสูงจากความกดอากาศ (barometric altitude)** ซึ่งได้จากความกดอากาศภายนอกอากาศยาน วัดผ่านช่องเปิดเล็ก ๆ บนลำตัวที่เรียกว่าช่องรับความดันสถิต (static port) ความกดอากาศลดลงตามความสูงในลักษณะที่รู้แน่ชัด (ประมาณ 1 hPa ต่อ 8 เมตรใกล้พื้นดิน และลดลงช้ากว่านั้นเมื่อสูงขึ้น) และมาตรวัดความสูงทุกเครื่องในโลกแปลงความกดอากาศเป็นความสูงโดยใช้บรรยากาศมาตรฐานเดียวกัน อ้างอิงที่ 1013.25 hPa ที่ระดับน้ำทะเล ในวันที่ความกดอากาศผิดปกติ ความสูงจากความกดอากาศของอากาศยานทุกลำจะผิดไปเท่ากัน ซึ่งนั่นคือประเด็นสำคัญพอดี: สิ่งที่สำคัญสำหรับการแยกระยะห่างไม่ใช่ความสูงจริงเหนือระดับทะเล แต่คืออากาศยานสองลำที่อ่านค่าได้ "ระดับการบิน 350" ทั้งคู่ อยู่ห่างจากลำที่อ่านได้ "ระดับการบิน 340" 300 เมตรจริง ๆ ADS-B กระจายความสูงจากความกดอากาศในข้อความตำแหน่ง เป็นขั้นละ 25 ฟุต (7.6 m) และกระจายผลต่างระหว่างค่านั้นกับความสูงจากดาวเทียมแยกต่างหาก เพื่อให้เครื่องรับได้ทั้งสองค่ากลับคืนมา

บทที่ 5

โครงสร้างของข้อความ

ข้อความ ADS-B ที่เครื่องบินโดยสารทั่วโลกใช้คือการส่งสัญญาณ Mode S ที่เรียกว่า **extended squitter** คำว่า "squitter" เป็นศัพท์สแลงเก่าของวงการเรดาร์ หมายถึงการส่งสัญญาณที่ส่งออกไปเองแทนที่จะเป็นการตอบกลับ และ "extended" (ขยาย) เพราะที่ขนาด 112 บิต มันยาวเป็นสองเท่าของคำตอบ Mode S ดั้งเดิม วิศวกรเขียนว่า "1090ES" แทน "1090 MHz extended squitter" การส่งแต่ละครั้งใช้เวลารวม 120 ไมโครวินาที: *พรีแอมเบิล (preamble)* 8 ไมโครวินาที ซึ่งเป็นรูปแบบคงที่ของพัลส์สี่พัลส์ที่ช่วยให้เครื่องรับจำจุดเริ่มต้นของข้อความและปรับนาฬิกาให้ตรงกัน ตามด้วยบิตข้อมูล 112 บิตในอัตราหนึ่งบิตต่อไมโครวินาที

บิตถูกส่งอย่างไร: การมอดูเลตตำแหน่งพัลส์

ช่องบิตแต่ละช่องยาวหนึ่งไมโครวินาทีถูกแบ่งเป็นสองครึ่ง พัลส์พลังงานวิทยุในครึ่งแรกและความเงียบในครึ่งหลังหมายถึง 1 ความเงียบตามด้วยพัลส์หมายถึง 0 ดังนั้นจึงมีพัลส์หนึ่งพัลส์ต่อหนึ่งบิตพอดีไม่ว่าข้อมูลจะเป็นอะไร และเครื่องรับเพียงต้องตัดสินว่าครึ่งใดของแต่ละช่องดังกว่า วิธีนี้คือการมอดูเลตตำแหน่งพัลส์ (pulse position modulation) ซึ่งทนทานต่อสัญญาณรบกวนและการจางหายแบบที่สัญญาณต้องเผชิญระหว่างทางจากทรานสปอนเดอร์ไปยังสายอากาศที่อยู่ไกล และถอดรหัสได้ด้วยต้นทุนต่ำ

สี่บิตในการมอดูเลตตำแหน่งพัลส์: 1, 0, 1, 1



แต่ละช่องยาว 1 ไมโครวินาที พัลส์ในครึ่งแรก: 1 พัลส์ในครึ่งหลัง: 0

112 บิต

DF 5 บิต รูปแบบดาวน์ลิงก์	CA 3 บิต ความสามารถ	ที่อยู่ ICAO 24 บิต เอกลักษณ์เฉพาะของอากาศยาน	ME - ข้อมูลหลัก 56 บิต ตำแหน่ง ความสูง ความเร็ว รหัสเรียกขาน หรือสถานะ ขึ้นอยู่กับรหัสประเภทใน 5 บิตแรก	PI 24 บิต การตรวจสอบข้อผิดพลาด (CRC)

ห้าบิตแรกคือรูปแบบดาวน์ลิงก์ (downlink format) บอกว่านี่เป็นข้อความ Mode S ประเภทใด ค่า 17 หมายถึง "ADS-B จากทรานสปอนเดอร์ Mode S" **ที่อยู่ ICAO** ขนาด 24 บิตคือเอกลักษณ์ถาวรของอากาศยาน ซึ่งกำหนดให้เมื่อจดทะเบียน มีที่อยู่ที่เป็นไปได้ 2 ยกกำลัง 24 หรือ 16,777,216 ที่อยู่ ซึ่ง ICAO หน่วยงานการบินพลเรือนของสหประชาชาติจัดสรรเป็นช่วง ๆ ให้แก่แต่ละรัฐ ตัวอย่างเช่น อากาศยานของเบลเยียมมีที่อยู่ตั้งแต่ 448000 ถึง 44FFFF ในเลขฐานสิบหก ที่อยู่นี้ต่างจากรหัสสี่หลักของ Mode A แบบเก่า คือไม่เคยเปลี่ยนและไม่เคยใช้ร่วมกัน เครื่องรับจึงมั่นใจได้ว่ากำลังได้ยินอากาศยานลำใดตั้งแต่ข้อความแรก

ฟิลด์ **ME** ขนาด 56 บิตคือเนื้อหาจริง และห้าบิตแรกของมัน คือ *รหัสประเภท (type code)* บอกว่าส่วนที่เหลือมีความหมายว่าอะไร รหัสประเภท 1 ถึง 4 บรรจุรหัสเรียกขาน (call sign) ของอากาศยาน เช่น BEL1234 หรือ RYR7KL เป็นอักขระขนาดหกบิตจำนวนแปดตัว รหัส 9 ถึง 18 บรรจุตำแหน่งขณะบินพร้อมความสูงจากความกดอากาศ รหัส 20 ถึง 22 บรรจุข้อมูลเดียวกันแต่ใช้ความสูงจากดาวเทียม รหัส 19 บรรจุความเร็ว: ความเร็วภาคพื้นที่แยกเป็นองค์ประกอบตะวันออก-ตะวันตกและเหนือ-ใต้ อัตราการไต่หรือร่อนในแนวดิ่ง และผลต่างระหว่างความสูงจากความกดอากาศกับความสูงจากดาวเทียม รหัส 28, 29 และ 31 บรรจุสถานะ: รหัสฉุกเฉิน ความสูงที่เลือกไว้ และหมวดความสมบูรณ์และความแม่นยำที่บอกว่าตำแหน่งที่กระจายออกไปเชื่อถือได้มากเพียงใด (เช่น ค่า "NIC" เท่ากับ 8 รับประกันด้วยความน่าจะเป็นสูงว่าตำแหน่งจริงอยู่ภายใน 185 m จากตำแหน่งที่รายงาน)

24 บิตสุดท้ายคือ **การตรวจสอบความซ้ำซ้อนแบบวนรอบ (cyclic redundancy check)** ซึ่งเป็นตัวเลขที่คำนวณจาก 88 บิตก่อนหน้าด้วยการหารพหุนามที่กำหนดไว้ เครื่องรับคำนวณซ้ำกับบิตที่ถอดรหัสได้ หากผลลัพธ์ไม่ตรงกัน แสดงว่ามีอย่างน้อยหนึ่งบิตเสียหายระหว่างทาง และข้อความจะถูกทิ้ง เนื่องจากพัลส์ยาวหนึ่งไมโครวินาทีอาจสูญหายได้ง่ายเพราะสัญญาณรบกวนหรือข้อความจากอากาศยานลำอื่นที่ซ้อนทับกัน การตรวจสอบนี้จึงเป็นสิ่งที่กันไม่ให้ตำแหน่งที่ผิดเพี้ยนไปปรากฏบนหน้าจอของเจ้าหน้าที่ควบคุม ข้อความจริงตามที่เครื่องรับบันทึกไว้มีลักษณะดังนี้:

> `8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098`
>
> 8D: รูปแบบดาวน์ลิงก์ 17, ความสามารถ 5 4840D6: ที่อยู่ ICAO ของอากาศยานเนเธอร์แลนด์ 20...: รหัสประเภท 4 ซึ่งเป็นข้อความระบุตัว ถอดรหัสได้เป็นรหัสเรียกขาน KLM1023 576098: การตรวจสอบข้อผิดพลาด

ใส่โลกทั้งใบลงใน 34 บิต

ข้อความตำแหน่งมีเพียง 17 บิตสำหรับละติจูดและ 17 บิตสำหรับลองจิจูด นั่นคือ 131,072 ขั้นรอบโลกทั้งใบ ขั้นละประมาณ 300 m ที่เส้นศูนย์สูตร: ยังไม่ดีพอเลย ADS-B แก้ปัญหานี้ด้วย **การรายงานตำแหน่งแบบกะทัดรัด (compact position reporting)** โลกถูกแบ่งเป็นโซน 17 บิตให้ตำแหน่งที่แม่นยำมาก (ประมาณ 5 m) ภายในโซน แต่ไม่ได้บอกว่าเป็นโซนใด อากาศยานสลับไปมาระหว่างตารางโซนสองแบบที่ต่างกันเล็กน้อย คือข้อความ "คู่" (even) และ "คี่" (odd) และเครื่องรับที่ได้ยินอย่างละหนึ่งข้อความจะหาโซนได้อย่างไม่กำกวม เมื่อหาได้แล้ว ข้อความเดียวก็เพียงพอสำหรับติดตามอากาศยาน เพราะมันแทบไม่มีทางกระโดดไปโซนอื่นได้ในครึ่งวินาที นี่คือเคล็ดลับที่แยบยลซึ่งเพิ่มความแม่นยำที่ใช้ได้เป็นสองเท่าโดยไม่เสียบิตเพิ่ม

บ่อยแค่ไหน

ทรานสปอนเดอร์ขณะบินส่งข้อความตำแหน่งวินาทีละสองครั้ง ข้อความความเร็ววินาทีละสองครั้ง และรหัสเรียกขานทุกห้าวินาที รวมถึงข้อความสถานะในช่วงห่างที่นานกว่า รวมแล้วประมาณสี่ถึงห้า extended squitter ต่อวินาที แต่ละครั้งใช้เวลา 120 ไมโครวินาที ทรานสปอนเดอร์จึงส่ง ADS-B จริง ๆ น้อยกว่าหนึ่งในพันของเวลาทั้งหมด เวลาที่เหลือของแต่ละวินาทีมันรับฟังและตอบการสอบถามของเรดาร์ที่ 1030 MHz รวมถึงการสอบถามจากระบบหลีกเลี่ยงการชนของอากาศยานลำอื่น

บทที่ 6 - ฟิสิกส์

คลื่น: วิทยุในฐานะแสงที่มองไม่เห็น

ข้อความออกจากอากาศยานในรูปของ**คลื่นวิทยุ** และแนวคิดที่มีประโยชน์ที่สุดเพียงข้อเดียวในหลักสูตรนี้คือ คลื่นวิทยุกับลำแสงเป็นสิ่งเดียวกัน ทั้งสองเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า: รูปแบบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สั่นไปพร้อมกันและเดินทางผ่านอวกาศด้วยความเร็วแสง c ซึ่งเท่ากับ 299,792,458 เมตรต่อวินาที หรือใกล้เคียงกับ 300,000 km/s สิ่งที่ทำให้คลื่นวิทยุต่างจากแสงสีเขียว จากรังสีเอกซ์ในโรงพยาบาล หรือจากไมโครเวฟในเตาอบในครัว มีเพียงความเร็วที่สนามสั่นเท่านั้น: **ความถี่** f วัดเป็นเฮิรตซ์ (จำนวนครั้งที่สั่นต่อวินาที)

เนื่องจากคลื่นเดินทางด้วยความเร็วคงที่ ความถี่จึงกำหนดระยะห่างจากยอดคลื่นหนึ่งถึงยอดถัดไป ซึ่งก็คือ **ความยาวคลื่น** lambda ในหนึ่งวินาที คลื่นเดินทางได้ c เมตรและสั่นครบ f รอบ การสั่นแต่ละรอบจึงกินระยะ c / f เมตร:

$$c = f \times \lambda$$

สำหรับ ADS-B: lambda = 300,000,000 / 1,090,000,000 = 0.275 m คลื่นระหว่างอากาศยานกับสายอากาศของคุณมียอดคลื่นห่างกัน 27.5 cm หรือประมาณความยาวของไม้บรรทัดนักเรียน

คลื่น	ความถี่	ความยาวคลื่น	หมายเหตุ
วิทยุกระจายเสียง FM	100 MHz	3 m	สายอากาศรถยนต์ยาวเพียงเศษส่วนของค่านี้
ADS-B / Mode S	1,090 MHz	27.5 cm	ใช้กับคำตอบของทรานสปอนเดอร์เรดาร์ด้วย
โทรศัพท์มือถือ (ย่าน 4G)	1,800 MHz	17 cm	เพื่อนบ้านใกล้ชิดในสเปกตรัม
Wi-Fi, เตาไมโครเวฟ	2,450 MHz	12 cm	ความถี่เดียวกัน แต่กำลังต่างกันมหาศาล
แสงสีเขียวที่มองเห็นได้	560,000,000 MHz	0.000 54 mm	ความถี่สูงกว่าครึ่งล้านเท่า

มีผลสืบเนื่องสองประการที่สำคัญต่อทุกสิ่งที่ตามมา ประการแรก เนื่องจากคลื่นนี้คือแสง มันจึงเดินทางเป็นเส้นตรงเว้นแต่มีสิ่งใดหักเหหรือกีดขวาง และมันไม่ทะลุผ่านโลก สิ่งนี้กำหนดระยะของระบบ ซึ่งเป็นหัวข้อของบทที่ 7 ประการที่สอง เนื่องจากความยาวคลื่นคือ 27.5 cm โครงสร้างโลหะที่มีปฏิสัมพันธ์กับมันได้แรงที่สุด คือสายอากาศ จึงมีขนาดในระดับเดียวกัน ซึ่งเป็นหัวข้อของบทที่ 8

ทำไมวิทยุไม่ใช่เสียง

ความสับสนที่พบบ่อยที่สุด ทั้งในผู้ใหญ่และเด็ก คือระหว่างวิทยุกับเสียง อาจเป็นเพราะ "วิทยุ" คือกล่องที่ส่งเสียงออกมา แต่ทั้งสองเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกันเลย เสียงคือคลื่นความดันในอากาศ เป็นห่วงโซ่ของโมเลกุลที่ผลักโมเลกุลข้างเคียง มันต้องอาศัยตัวกลางในการเดินทาง เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 340 m/s และไม่สามารถข้ามสุญญากาศได้ วิทยุไม่ต้องอาศัยอะไรเลย: มันข้ามสุญญากาศระหว่างดาวเทียมกับอากาศยานได้ และเคลื่อนที่เร็วกว่าเสียงเกือบล้านเท่า เสียงเครื่องยนต์ของอากาศยานกับข้อความ ADS-B ออกจากอากาศยานในเวลาเดียวกัน ข้อความไปถึงเครื่องรับที่อยู่ห่างออกไป 20 km ภายใน 67 ไมโครวินาที ส่วนเสียงไปถึงช้ากว่านั้นเต็ม ๆ หนึ่งนาที

ทำไมต้อง 1090 MHz

ความถี่นี้เป็นมรดกตกทอด ข้อตกลงระหว่างประเทศในทศวรรษ 1950 สงวนย่านความถี่ 960 ถึง 1215 MHz ไว้สำหรับวิทยุช่วยการเดินอากาศ และ 1090 MHz กลายเป็นความถี่ตอบกลับของทรานสปอนเดอร์เรดาร์ทุติยภูมิ เมื่อออกแบบ ADS-B การนำทรานสปอนเดอร์ที่ติดตั้งอยู่แล้วในเครื่องบินโดยสารทุกลำมาใช้ซ้ำนั้นถูกกว่าการติดตั้งวิทยุใหม่มาก ADS-B จึงกลายเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ทรานสปอนเดอร์ Mode S พูดออกมาที่ 1090 MHz ในสหรัฐอเมริกา อากาศยานขนาดเล็กที่บินต่ำกว่าประมาณ 5,500 m อาจใช้ระบบที่สองแทน คือ UAT ที่ 978 MHz ซึ่งเป็นเหตุผลที่เครื่องรับที่นั่นมักรับฟังทั้งสองความถี่

บทที่ 7 - ฟิสิกส์

ระยะ: ความโค้งของโลกและการจางลงของสัญญาณ

ทรานสปอนเดอร์ส่งสัญญาณด้วยกำลังสูงสุดไม่กี่ร้อยวัตต์ สัญญาณเช่นนี้จะได้ยินได้ไกลแค่ไหน มีสองสิ่งที่ต่างกันมากซึ่งจำกัดมันไว้ และควรแยกทั้งสองออกจากกัน: เรขาคณิต ซึ่งกำหนดขอบเขตที่ตายตัว และกำลัง ซึ่งกำหนดขอบเขตที่ค่อย ๆ จางไป

ขอบฟ้าวิทยุ

ที่ 1090 MHz วิทยุมีพฤติกรรมเหมือนแสง: มันเดินทางเป็นเส้นตรงและไม่โค้งไปรอบโลก สายอากาศภาคพื้นดินจึงได้ยินอากาศยานได้ก็ต่อเมื่อมีเส้นตรงระหว่างทั้งสองที่ไม่ผ่านพื้นดิน สำหรับผู้สังเกตที่พื้นผิว ขอบฟ้าคือจุดที่เส้นนั้นเพิ่งเฉียดผิวโลก ยิ่งอากาศยานสูง จุดเฉียดนั้นก็ยิ่งไกล ยิ่งสายอากาศสูง ก็ยิ่งไกลขึ้นไปอีก เรขาคณิตของเส้นสัมผัสทรงกลมให้ผลลัพธ์ที่เรียบง่าย: ระยะถึงขอบฟ้าเป็นกิโลเมตรประมาณ 3.57 เท่าของรากที่สองของความสูงเป็นเมตร บรรยากาศหักเหคลื่นวิทยุลงเล็กน้อย ทำให้ขอบฟ้ายืดออกไปประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ วิศวกรจึงใช้ค่า 4.12 แทน:

```
d (km) = 4.12 x ( sqrt(h aircraft) + sqrt(h antenna) )   heights in metres
```

อากาศยานที่ 11,000 m สายอากาศบนหลังคาสูง 20 m: 4.12 x (104.9 + 4.5) = 451 km อากาศยานที่ 1,000 m หลังคาเดียวกัน: 4.12 x (31.6 + 4.5) = 149 km อากาศยานบนพื้นดินห่างออกไป 15 km: ไม่ได้ยินเลย เว้นแต่พื้นที่ระหว่างกันจะราบเรียบและโล่ง



สิ่งนี้อธิบายรูปร่างเฉพาะตัวของพื้นที่ครอบคลุมของเครื่องรับ: วงกลมรัศมี 400 km หรือมากกว่าสำหรับการจราจรที่บินสูง หดลงเหลือไม่กี่สิบกิโลเมตรสำหรับอากาศยานที่กำลังร่อนลงจอด และแทบไม่มีเลยสำหรับอากาศยานบนพื้นดิน ยกเว้นที่สนามบินข้าง ๆ มันยังอธิบายด้วยว่าทำไมความสูงของเครื่องรับจึงสำคัญกว่าคุณภาพของเครื่องรับมาก และทำไมเนินเขา อาคารสูง หรือแม้แต่ปีกของอากาศยานเองขณะเอียงตัวหันออกจากคุณ จึงตัดสัญญาณได้ทันที

กฎกำลังสองผกผัน

ภายในขอบฟ้า สัญญาณจะอ่อนลงตามระยะทาง สายอากาศของทรานสปอนเดอร์แผ่สัญญาณไปทุกทิศทางในแนวราบ กำลังของมันจึงกระจายออกไปบนทรงกลมที่ใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ พื้นที่ผิวของทรงกลมเพิ่มขึ้นตามกำลังสองของรัศมี ดังนั้น กำลังที่ตกกระทบสายอากาศขนาดคงที่จึงลดลงตามกำลังสองของระยะทาง: ไกลขึ้นสองเท่า กำลังเหลือหนึ่งในสี่ ไกลขึ้นสิบเท่า เหลือหนึ่งในร้อย วิศวกรแสดงค่านี้เป็น*การสูญเสียตามเส้นทาง (path loss)* ในหน่วยเดซิเบล และสำหรับ 1090 MHz ที่ระยะ 400 km จะมีค่าประมาณ 145 dB หมายความว่ากำลังที่รับได้น้อยกว่ากำลังที่ส่งประมาณ 10 ยกกำลัง 14.5 เท่า พัลส์ 250 วัตต์มาถึงในระดับประมาณหนึ่งในสิบของหนึ่งในพันล้านมิลลิวัตต์ เครื่องรับที่ดีตรวจจับค่านั้นได้แบบเฉียดฉิว ซึ่งเป็นเหตุผลที่ขอบฟ้าเชิงเรขาคณิตกับขีดจำกัดด้านกำลังบังเอิญตรงกันที่ระยะไม่กี่ร้อยกิโลเมตร: ระบบถูกออกแบบมาเช่นนั้น

ขีดจำกัดทั้งสองมีปฏิสัมพันธ์กันในแบบที่ควรทำความเข้าใจ ภายในขอบฟ้า สัญญาณแรงจากอากาศยานที่อยู่ใกล้และสัญญาณอ่อนจากอากาศยานที่อยู่ไกลถอดรหัสได้สมบูรณ์ทั้งคู่ เพราะวิธีการตำแหน่งพัลส์ในบทที่ 5 ถามเพียงว่าครึ่งใดของแต่ละช่องบิตดังกว่า ไม่ได้ถามว่าดังแค่ไหน สัญญาณไม่ได้ค่อย ๆ จางจนใช้ไม่ได้เมื่ออากาศยานถอยห่างออกไป มันยังถอดรหัสได้จนกระทั่งที่ใดที่หนึ่งใกล้ขอบฟ้า เรขาคณิตตัดมันออกไป หรือสัญญาณรบกวนในเครื่องรับกลบมันจนหมด ในที่สุด แล้วเส้นทางการติดตามก็หยุดลง นั่นคือเหตุผลที่แผนที่พื้นที่ครอบคลุมมีขอบที่คม และทำไมอากาศยานที่อยู่ไกลที่สุดที่เครื่องรับได้ยินจึงแทบจะเป็นลำที่บินสูงที่สุดเสมอ

บทที่ 8 - ฟิสิกส์

สายอากาศ: การจับคลื่นยาว 27 เซนติเมตร

สายอากาศคือชิ้นตัวนำที่มีรูปร่างทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านมาทำให้อิเล็กตรอนในตัวมันเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน เกิดเป็นกระแสสลับขนาดเล็กมากที่เครื่องรับสามารถขยายได้ สิ่งที่กลับกันเกิดขึ้นในเครื่องส่ง: กระแสสลับในสายอากาศของอากาศยานปล่อยคลื่นออกไป ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวนำเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ลวดตรงจะตอบสนองได้แรงที่สุด หรือ*สั่นพ้อง (resonate)* เมื่อมันยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ทำให้กระแสที่ไหลไปมาตามลวดเข้ากับการสั่นของคลื่นได้พอดี เหมือนชิงช้าของเด็กที่ถูกผลักตามจังหวะธรรมชาติของมัน สำหรับ 1090 MHz ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นคือ 13.75 cm

รูปแบบที่ใช้กันมากที่สุดในทางปฏิบัติคือ **สายอากาศโมโนโพลหนึ่งในสี่ความยาวคลื่น (quarter-wave monopole)**: แท่งตั้งตรงยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น คือ 6.9 cm ตั้งอยู่บนพื้นผิวที่นำไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า*ระนาบกราวด์ (ground plane)* ระนาบกราวด์ทำหน้าที่เหมือนกระจก แท่งกับภาพสะท้อนของมันจึงทำงานร่วมกันเหมือนสายอากาศครึ่งความยาวคลื่น นี่คือเหตุผลที่สายอากาศ ADS-B บนอากาศยานเป็นใบมีดสั้น ๆ สูงไม่กี่เซนติเมตรบนลำตัว โดยลำตัวทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์ และทำไมสายอากาศของนักเล่นอดิเรกจึงเป็นลวดสั้น ๆ บนฝากระป๋อง ลวดที่ยาวผิดขนาดก็ยังใช้ได้ แต่ได้ผลน้อยกว่ามาก: "หูโลหะ" นั้นถูกปรับจูนไว้

คุณสมบัติอีกสามประการของสายอากาศเป็นผลมาจากฟิสิกส์ และแต่ละข้อมีผลที่มองเห็นได้ ประการแรกคือ **โพลาไรเซชัน (polarisation)** สนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสั่นในทิศทางที่แน่นอนซึ่งตั้งฉากกับทิศการเดินทาง และสายอากาศตอบสนองเฉพาะองค์ประกอบของสนามที่อยู่ตามแนวความยาวของมันเท่านั้น สายอากาศของอากาศยานติดตั้งในแนวตั้ง คลื่น ADS-B จึงมาถึงแบบโพลาไรซ์แนวตั้ง และสายอากาศรับก็ต้องตั้งตรงเช่นกัน หากวางนอน มันแทบไม่ได้ยินอะไรเลย เหมือนคลื่นบนเชือกที่สะบัดขึ้นลงถูกกั้นไว้ด้วยช่องแนวนอน ประการที่สองคือ **รูปแบบการแผ่คลื่น (radiation pattern)** สายอากาศแนวตั้งไวที่สุดในทิศทางขอบฟ้า และไม่ไวเลยตามแนวแกนของตัวเอง ความไวในสามมิติจึงมีรูปร่างเหมือนโดนัทวงแหวนที่มีสายอากาศเสียบผ่านรูตรงกลาง เครื่องรับจึงได้ยินอากาศยานที่อยู่ห่าง 300 km ได้เป็นปกติโดยไม่ยาก แต่กลับขาดสัญญาณของลำที่บินผ่านเหนือศีรษะพอดีไปไม่กี่วินาที ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรสังเกตบนแผนที่สดใด ๆ การซ้อนองค์ประกอบที่สั่นพ้องหลายชิ้นต่อกันในแนวตั้งจะบีบโดนัทให้แบนลง รวมความไวไปทางขอบฟ้า ซึ่งเป็นที่อยู่ของอากาศยานที่อยู่ไกล โดยแลกกับความไวเหนือศีรษะ นี่คือความหมายของ**อัตราขยาย (gain)** ของสายอากาศ และมันเป็นการกระจายความไวใหม่เสมอ ไม่เคยเป็นการสร้างความไวขึ้นมา

ประการที่สามเกี่ยวกับสิ่งที่อยู่ระหว่างสายอากาศกับเครื่องรับ สายอากาศไม่ได้รับเพียง 1090 MHz แต่รับทุกสัญญาณในบริเวณนั้น รวมถึงการส่งสัญญาณของโทรศัพท์มือถือที่ห่างไปไม่กี่ร้อยเมกะเฮิรตซ์ซึ่งแรงกว่ามาก ตัวกรองที่ให้ผ่านเฉพาะย่านความถี่การบินจึงถูกวางไว้เป็นลำดับแรก จากนั้นสัญญาณต้องเดินทางไปตามสายเคเบิล และที่ 1090 MHz สายโคแอกเชียลสูญเสียสัญญาณประมาณครึ่งหนึ่งทุก ๆ สิบเมตร วิธีแก้คือใช้เครื่องขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (low-noise amplifier) ที่สายอากาศ ก่อนถึงสายเคเบิล เพื่อให้สัญญาณแรงพอที่จะรอดจากการเดินทาง แทนที่จะขยายที่เครื่องรับ ซึ่งจะเป็นการขยายสัญญาณรบกวนของสายเคเบิลไปพร้อมกับสัญญาณที่เหลืออยู่ สิ่งเหล่านี้เป็นรายละเอียด แต่เป็นรายละเอียดที่ตัดสินว่าเครื่องรับบนหลังคาโรงเรียนจะได้ยินอากาศยานที่ขอบฟ้า หรือได้ยินเพียงลำที่อยู่ใกล้ ๆ

บทที่ 9

การรับและการถอดรหัส

ระหว่างสายอากาศกับจุดบนแผนที่มีห่วงโซ่ห้าขั้นตอน สายอากาศเปลี่ยนคลื่นที่ผ่านมาให้เป็นกระแสสลับขนาดไม่กี่ไมโครโวลต์ ตัวกรองและเครื่องขยายสัญญาณรบกวนต่ำเก็บย่าน 1090 MHz ไว้ ปฏิเสธทุกอย่างที่เหลือ และเพิ่มสัญญาณขึ้นพันเท่า วิทยุที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ปรับไปที่ความถี่นั้นและสุ่มตัวอย่างสัญญาณสองล้านครั้งต่อวินาที เปลี่ยนให้เป็นกระแสข้อมูลตัวเลข ตัวถอดรหัสค้นหารูปแบบพรีแอมเบิลในกระแสข้อมูลนั้น อ่าน 112 บิต ตรวจสอบพาริตี และถอดรหัสฟิลด์ต่าง ๆ และตัวติดตาม (tracker) รวบรวมข้อความจากอากาศยานแต่ละลำเป็นระเบียนเดียวที่อัปเดตอย่างต่อเนื่อง: ตำแหน่ง เส้นทาง และป้ายชื่อ

ขั้นตอนที่น่าทึ่งคือขั้นที่สาม จนกระทั่งราวปี 2010 การถอดรหัส 1090 MHz ต้องใช้ฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นโดยเฉพาะซึ่งมีราคาหลายพันยูโร จากนั้นนักเล่นอดิเรกก็ค้นพบว่าตัวรับสัญญาณโทรทัศน์แบบ USB ราคา 20 ยูโรมีชิปที่สั่งให้ปรับไปความถี่ใดก็ได้และส่งสัญญาณดิบให้คอมพิวเตอร์ได้ **วิทยุที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (software-defined radio)** นี้เปลี่ยนปัญหาด้านวิทยุให้เป็นปัญหาด้านการเขียนโปรแกรม: แล็ปท็อปหรือ Raspberry Pi รับกระแสตัวเลขสองล้านค่า

ต่อวินาทีที่อธิบายความแรงของสัญญาณ และซอฟต์แวร์ฟรีจะค้นหารูปแบบพรีแอมเบิล วัดว่าครึ่งใดของแต่ละช่องไมโครวินาทีดังกว่า ประกอบ 112 บิต คำนวณ CRC และแสดงฟิลด์ต่าง ๆ ออกมา โครงงานเครื่องรับในชุดการเรียนระดับมัธยมคือห่วงโซ่นี้เอง และโรงเรียนสามารถสร้างได้ในงบไม่ถึง 100 ยูโร

ขั้นตอนตัวติดตามคือจุดที่กระแสข้อความกลายเป็นความรู้ อย่าลืมว่าข้อความตำแหน่งข้อความเดียวยังกำกวมจนกว่าจะจับคู่ข้อความคู่และคี่ได้ ความเร็วมาแยกจากตำแหน่ง รหัสเรียกขานก็มาแยกอีกต่างหาก ตัวติดตามเย็บข้อมูลเหล่านี้เข้าด้วยกันตามที่อยู่ ICAO ทิ้งทุกอย่างที่ไม่ผ่านการตรวจสอบข้อผิดพลาด และเก็บสถานะล่าสุดที่รู้ของอากาศยานแต่ละลำไว้ หากไม่มีข้อความมาถึงเป็นเวลาหนึ่งนาที ซึ่งมักเป็นเพราะอากาศยานลดระดับลงต่ำกว่าขอบฟ้า เส้นทางการติดตามนั้นจะหมดอายุ

บทที่ 10

จากเครื่องรับเครื่องเดียวสู่แผนที่ทั้งทวีป

เครื่องรับหนึ่งเครื่องได้ยินท้องฟ้าเป็นวงกลมกว้างไม่กี่ร้อยกิโลเมตร แผนที่ยุโรปต้องใช้เครื่องรับหลายร้อยเครื่อง และเครื่องที่มีประโยชน์ไม่ได้อยู่ในเมือง แต่กระจายตัวออกไป: ตามชายฝั่ง ในหุบเขา บนเกาะ ทุกที่ที่วงกลมของเครื่องรับอื่นเข้าไม่ถึง เครื่องรับแต่ละเครื่องส่งข้อความที่ถอดรหัสแล้ว ซึ่งแต่ละข้อความประทับเวลาที่มาถึง ผ่านอินเทอร์เน็ตไปยังบริการส่วนกลาง บริการนั้นทำการ*รวบรวม (aggregate)*: ข้อความเดียวกันจากอากาศยานที่บินสูงมักมาถึงจากเครื่องรับสิบหรือยี่สิบเครื่องพร้อมกัน และต้องจำแนกข้อมูลซ้ำแล้วรวมเข้าด้วยกัน มันยังตรวจสอบด้วย: ตำแหน่งที่ไม่ตรงกับมุมมองของเครื่องรับข้างเคียงทุกเครื่องต่ออากาศยานลำเดียวกัน อาจเป็นความผิดพลาดในการถอดรหัสหรือทรานสปอนเดอร์ที่บกพร่อง และจะถูกทำเครื่องหมายหรือทิ้งไป

การหาตำแหน่งแบบหลายจุด: การค้นหาอากาศยานที่ไม่ได้บอกว่าตัวเองอยู่ที่ไหน

ไม่ใช่อากาศยานทุกลำที่กระจายตำแหน่ง ทรานสปอนเดอร์รุ่นเก่าตอบเรดาร์ด้วยรหัสระบุตัวและความสูง แต่ไม่มีข้อมูลจากดาวเทียม อากาศยานบางลำจงใจไม่ส่งตำแหน่งเลย ถึงอย่างนั้น การส่งสัญญาณที่ 1090 MHz ของพวกมันก็ยังมาถึงภาคพื้นดิน และเครือข่ายสามารถหาตำแหน่งของพวกมันได้ด้วยการกลับด้านการนำทางด้วยดาวเทียม หากเครื่องรับสี่เครื่องที่นาฬิกาตรงกันอย่างแม่นยำต่างบันทึกช่วงเวลาที่การส่งสัญญาณเดียวกันมาถึง ผลต่างระหว่างช่วงเวลาเหล่านั้นจะเผยให้เห็นผลต่างของระยะทาง: ข้อความที่ถึงเครื่องรับ A ก่อนเครื่องรับ B หนึ่งไมโครวินาที ถูกส่งมาจากจุดที่อยู่ใกล้ A มากกว่า B อยู่ 300 m จุดทั้งหมดที่มีคุณสมบัตินี้อยู่บนพื้นผิวโค้งที่เรียกว่าไฮเพอร์โบลอยด์ระหว่าง A กับ B พื้นผิวเช่นนี้สามพื้นผิวจากเครื่องรับสี่เครื่องจะตัดกันที่ตำแหน่งของอากาศยาน นี่คือ **การหาตำแหน่งแบบหลายจุด (multilateration)** และต้องจับเวลาได้แม่นยำในระดับประมาณหนึ่งในสิบไมโครวินาที หรือ 30 m ข้ามเครื่องรับที่อยู่ห่างกันหลายร้อยกิโลเมตร ซึ่งเครื่องรับได้มาจากดาวเทียมชุดเดียวกับที่อากาศยานใช้

แนวคิดเดียวกัน สองครั้ง
การนำทางด้วยดาวเทียม: เครื่องรับหนึ่งเครื่อง เครื่องส่งสี่เครื่องที่รู้ตำแหน่ง แก้สมการหาตำแหน่งเครื่องรับ การหาตำแหน่งแบบหลายจุด: เครื่องส่งหนึ่งเครื่อง เครื่องรับสี่เครื่องที่รู้ตำแหน่ง แก้สมการหาตำแหน่งเครื่องส่ง ในทั้งสองกรณี สิ่งที่วัดจริง ๆ คือเวลา และ 1 ไมโครวินาทีเท่ากับ 300 เมตร

บทที่ 11

ใช้ทำอะไร และมีข้อบกพร่องตรงไหน

การควบคุมจราจรทางอากาศคือผู้ใช้รายแรก ทั่วยุโรป เจ้าหน้าที่ควบคุมในปัจจุบันเห็นภาพที่หลอมรวมกัน ซึ่ง ADS-B ที่อัปเดตวินาทีละสองครั้งและมีความแม่นยำระดับดาวเทียมถูกรวมเข้ากับเรดาร์และการหาตำแหน่งแบบหลายจุด ในพื้นที่ที่เรดาร์ไม่เคยไปถึง เช่น เหนือมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือ อาร์กติก ทะเลทรายซาฮารา และมหาสมุทรส่วนใหญ่ ข้อความ ADS-B ถูกรับโดยเครื่องรับที่ติดไปกับดาวเทียมสื่อสารวงโคจรต่ำ ซึ่งทำให้อากาศยานที่บินข้ามแอตแลนติกสามารถบินห่างกันน้อยลงได้มากกว่าเดิม อากาศยานคือผู้ใช้รายที่สอง: เครื่องบินโดยสารที่มี "ADS-B In" จะแสดงการจราจรใกล้เคียงให้ลูกเรือเห็นและป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบหลีกเลี่ยงการชน สนามบินใช้มันติดตามอากาศยานและยานพาหนะบนพื้นดินในยามหมอกลง นักวิจัยใช้ข้อมูลเปิดเพื่อศึกษาเสียงรบกวน การใช้เชื้อเพลิง ทางควัน (contrail) และความล่าช้า และเครื่องรับบนหลังคาโรงเรียนก็เป็นผู้มีส่วนร่วมในทั้งหมดนี้ในแบบเล็ก ๆ ของตัวเอง

จุดอ่อนของระบบเป็นผลโดยตรงจากการออกแบบ และแต่ละข้อควรทำความเข้าใจ มากกว่าแค่จดรายการไว้ เนื่องจากข้อความถูกกระจายโดยไม่เข้ารหัสและไม่มีลายเซ็น จึงไม่มีสิ่งใดในตัวข้อความที่พิสูจน์ได้ว่ามันมาจากอากาศยาน เครื่องส่งบนพื้นดินอาจกระจายข้อความที่มีรูปแบบสมบูรณ์แบบซึ่งบรรยายถึงอากาศยานที่ไม่มีอยู่จริงได้ (อย่างผิดกฎหมาย) และเครื่องรับก็จะถอดรหัสมันโดยไม่มีข้อติ สิ่งที่ปกป้องระบบไม่ใช่ตัวข้อความ แต่เป็นบริบทรอบตัวมัน: อากาศยานผีจะไม่ปรากฏบนเรดาร์ จะไม่ถูกพบด้วยการหาตำแหน่งแบบหลายจุด และจะไม่มีพฤติกรรมเหมือนการจราจรจริง และศูนย์ควบคุมก็ตรวจสอบไขว้กันอย่างต่อเนื่อง โพรโทคอลรุ่นที่มีลายเซ็นเข้ารหัสได้รับการหารือมาหลายปีแล้ว อุปสรรคไม่ได้อยู่ที่ด้านเทคนิคมากเท่าด้านปฏิบัติ เพราะทรานสปอนเดอร์ทุกเครื่องในโลกจะต้องเปลี่ยน

เนื่องจากตำแหน่งพึ่งพาเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมของอากาศยาน สิ่งใดก็ตามที่รบกวนการนำทางด้วยดาวเทียมก็จะรบกวน ADS-B ด้วย การรบกวนสัญญาณ (jamming) และการปลอมสัญญาณ (spoofing) ของดาวเทียมกลายเป็นเรื่องปกติใกล้เขตความขัดแย้ง และอากาศยานที่บินผ่านพื้นที่เช่นนั้นอาจคำนวณตำแหน่งไม่ได้ หรืออาจคำนวณได้ผิด ข้อความของมันจะมีหมวดความสมบูรณ์ที่ลดลง ระบบของเจ้าหน้าที่ควบคุมจะทำเครื่องหมายไว้ และเรดาร์ ซึ่งเป็นการวัดแบบอิสระที่ ADS-B ไม่เคยถูกออกแบบมาเพื่อแทนที่ทั้งหมด จะเข้ามารับหน้าที่แทน ความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองจึงไม่ใช่ผู้สืบทอดกับรุ่นก่อน แต่เป็นหุ้นส่วนที่มีจุดอ่อนเสริมกัน

เนื่องจากข้อบังคับครอบคลุมเครื่องบินโดยสารและอากาศยานขนาดใหญ่ส่วนใหญ่ แต่ไม่ครอบคลุมทุกสิ่งที่บินได้ แผนที่จึงไม่สมบูรณ์โดยการออกแบบ อากาศยานเบานอกห้วงอากาศควบคุม เครื่องร่อน บอลลูน และอากาศยานทหารจำนวนมากอาจไม่มี ADS-B เลย และอากาศยานเบาบางลำใช้ระบบอื่นที่เครื่องรับ 1090 MHz ไม่ได้ยิน และเนื่องจากการกระจายสัญญาณระบุตัวอากาศยาน มันจึงระบุตัวเจ้าของได้ด้วย: การติดตามเครื่องบินเจ็ตส่วนตัวลำหนึ่งโดยเนื้อแท้แล้วคือการติดตามบุคคลคนหนึ่ง ซึ่งนำไปสู่โครงการที่ปกปิดทะเบียนของอากาศยานที่เจ้าของร้องขอ และนำไปสู่การถกเถียงที่ยังดำเนินอยู่ว่าข้อมูลที่อากาศยานกระจายไปทั่วโลกจะเป็นข้อมูลส่วนตัวได้หรือไม่ นี่เป็นข้อถกเถียงที่ดีสำหรับนักเรียนที่โตแล้ว เพราะฟิสิกส์ไม่ได้ให้คำตอบสำหรับเรื่องนี้

บทที่ 12

ประวัติโดยย่อ

> **1935 ถึง 1945**
>
> เรดาร์ปฐมภูมิได้รับการพัฒนาในอังกฤษ เยอรมนี และสหรัฐอเมริกา เมื่อสงครามสิ้นสุด ทรานสปอนเดอร์ "ระบุมิตรหรือศัตรู" (identification friend or foe) ตอบพัลส์เรดาร์ด้วยคำตอบที่เข้ารหัส ซึ่งเป็นบรรพบุรุษของเรดาร์ทุติยภูมิ

ทศวรรษ 1950 ถึง 1960

เรดาร์ทุติยภูมิสำหรับพลเรือนได้รับการกำหนดมาตรฐาน: การสอบถามที่ 1030 MHz คำตอบที่ 1090 MHz รหัสระบุตัว Mode A และความสูง Mode C

ทศวรรษ 1980

Mode S ซึ่งมีที่อยู่ 24 บิตที่ไม่ซ้ำกันและข้อความข้อมูล ได้รับการพัฒนาที่ MIT Lincoln Laboratory และได้รับการรับรองโดย ICAO GPS เริ่มใช้งานได้สำหรับผู้ใช้พลเรือน

ทศวรรษ 1990 ถึง 2000

ADS-B ได้รับการนิยามและทดลองใช้ โดยเฉพาะในอะแลสกา ซึ่งการครอบคลุมด้วยเรดาร์เป็นไปไม่ได้และเกิดอุบัติเหตุบ่อย 1090 MHz extended squitter ได้รับการกำหนดมาตรฐานในระดับสากล

ทศวรรษ 2010

วิทยุที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ราคาถูกทำให้การรับสัญญาณกลายเป็นงานอดิเรก เครือข่ายอาสาสมัครที่มีเครื่องรับหลายพันเครื่องเกิดขึ้น เครื่องรับถูกส่งขึ้นไปกับดาวเทียมเพื่อครอบคลุมพื้นที่มหาสมุทร

2020

ADS-B กลายเป็นข้อบังคับสำหรับอากาศยานส่วนใหญ่ในห้วงอากาศควบคุมในสหรัฐอเมริกา (มกราคม) และสหภาพยุโรป (มิถุนายน โดยมีช่วงเปลี่ยนผ่านถึงสิ้นปี) ท้องฟ้าเริ่มพูด ทุกที่ ตลอดเวลา

อภิธานศัพท์

ADS-B
Automatic Dependent Surveillance - Broadcast อากาศยานกระจายตำแหน่งของตัวเอง

ความสูงจากความกดอากาศ
ความสูงที่ได้จากความกดอากาศ โดยใช้บรรยากาศมาตรฐานเป็นค่าที่อากาศยานรายงาน

CPR
การรายงานตำแหน่งแบบกะทัดรัด (compact position reporting) วิธีคู่/คี่ที่บรรจุตำแหน่งที่แม่นยำลงใน 34 บิต

CRC
การตรวจสอบความซ้ำซ้อนแบบวนรอบ (cyclic redundancy check) การตรวจสอบข้อผิดพลาดขนาด 24 บิตที่ท้ายทุกข้อความ

สควิตเตอร์แบบขยาย (Extended squitter)
การส่งสัญญาณ Mode S ขนาด 112 บิตที่ส่งออกไปเองและบรรจุ ADS-B

GNSS
ระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou

ที่อยู่ ICAO
เอกลักษณ์ถาวรขนาด 24 บิตของทรานสปอนเดอร์ของอากาศยาน

Mode S
มาตรฐานเรดาร์ทุติยภูมิแบบเลือกได้ซึ่งเป็นพื้นฐานของ ADS-B

การหาตำแหน่งแบบหลายจุด (multilateration)
การหาตำแหน่งของเครื่องส่งจากผลต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึงเครื่องรับหลายเครื่อง

การสูญเสียตามเส้นทาง (path loss)
การอ่อนลงของสัญญาณตามระยะทาง ตามกฎกำลังสองผกผัน

ขอบฟ้าวิทยุ
ระยะไกลที่สุดที่เส้นตรงระหว่างสายอากาศกับอากาศยานยังพ้นผิวโลก

SDR
วิทยุที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (software-defined radio): ตัวรับสัญญาณที่ส่งตัวอย่างสัญญาณดิบให้คอมพิวเตอร์ถอดรหัส

SSR

เรดาร์เฝ้าระวังทุติยภูมิ (secondary surveillance radar): ภาคพื้นดินสอบถาม ทรานสปอนเดอร์ตอบกลับ

ความยาวคลื่น

ระยะห่างระหว่างยอดคลื่นที่อยู่ติดกัน: c / f เท่ากับ 27.5 cm ที่ 1090 MHz

ทรานสปอนเดอร์

วิทยุบนอากาศยานที่ตอบเรดาร์และส่ง ADS-B ที่ 1090 MHz

ถัดไป

จากทฤษฎีสู่การปฏิบัติ: สร้างเครื่องรับ

สิบสองบทได้อธิบายระบบที่ตอนนี้คุณสามารถถือไว้ในมือได้ เวิร์กช็อปลงมือทำจะเปลี่ยนบทเหล่านั้นให้เป็นงานหนึ่งบ่าย: ต้องซื้ออะไรในงบ 100 ถึง 150 ยูโร วิธีสร้างและติดตั้งสายอากาศ วิธีเตรียม Raspberry Pi และติดตั้งโปรแกรมฟีดเดอร์ของ Dataero และวิธีดูอากาศยานที่คุณได้ยินปรากฏบนแผนที่สด โดยให้เครดิตแก่สถานีของคุณ ทุกบทข้างต้นมีการวัดรอคอยอยู่ที่นั่น: ขอบฟ้าวิทยุเทียบกับอากาศยานจริง กฎกำลังสองผกผันในคอลัมน์สัญญาณ และจังหวะประจำวันของท้องฟ้า

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