

भौतिकी और कंप्यूटिंग - 12 से 18 वर्ष

आसमान को डिकोड करना

नीचे दी हेक्साडेसिमल की पंक्ति एक वास्तविक संदेश है, जिसे एक वास्तविक विमान ने लगभग हर सेकंड दो बार भेजा। सेकंड के 112 दस-लाखवें हिस्सों में यह घोषित करता है कि विमान कौन है और, अपने साथी संदेशों में, वह कहाँ है, कितना ऊँचा और कितना तेज़। यह कोर्स उसे समझने के लिए ज़रूरी हर चीज़ से होकर गुज़रता है: उस तरंग की भौतिकी जिस पर वह सवार है, वह समय-मापन जो विमान को उसकी स्थिति देता है, वह कोडिंग जो उसे 112 बिट में समेटती है, वह ज्यामिति जो सीमित करती है कि उसे कितनी दूर से सुना जा सकता है, और वह रिसीवर जिसे आप उसे खुद सुनने के लिए बना सकते हैं।

सीखें - <https://radar.dataero.eu/hi/learning/ages-12-18/student> 2026-10-22

विषय-सूची

ADS-B क्या है, एक पृष्ठ में

पाठ 1 तरंग: अदृश्य प्रकाश के रूप में रेडियो

पाठ 2 समय-मापन और स्थिति: विमान कैसे जानता है कि वह कहाँ है

पाठ 3 संदेश: 112 बिट, और त्रुटियाँ कैसे पकड़ी जाती हैं

पाठ 4 सीमा: पृथ्वी की गोलाई और व्युत्क्रम वर्ग नियम

पाठ 5 एंटीना और रिसीवर: 27 सेंटीमीटर की तरंग से मैप पर एक बिंदु तक

चुनौतियाँ

आगे इसे बनाएँ

ADS-B क्या है, एक पृष्ठ में

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

एक एक्सटेंडेड स्क्विटर जैसा रिसीवर उसे दर्ज करता है: 28 हेक्साडेसिमल अंक, 112 बिट। पाठ 3 तक आप इसका हर फ़ील्ड पढ़ पाएँगे।

हवाई यातायात नियंत्रण को विमानों को अलग रखने के लिए हर विमान की स्थिति लगातार जाननी होती है: क़ूज़ पर उड़ता यात्री विमान हर सेकंड 250 m तय करता है, और पृथक्करण के नियम रडार नियंत्रण में विमानों के बीच ऊर्ध्वाधर दिशा में 300 m या क्षैतिज दिशा में 9 km की माँग करते हैं। सत्तर वर्षों तक जानने का तरीका रडार था: भू-केंद्र एक स्पंद भेजता है और प्रतिध्वनि का समय मापता है, या, उन्नत द्वितीयक रूप में, विमान पर लगे ट्रांसपोंडर से पूछताछ करता है जो 1090 MHz पर पहचान और ऊँचाई से उत्तर देता है। रडार की सीमाएँ हैं: उसे विशाल शक्ति चाहिए, वह हर विमान को एंटीना के हर चक्कर में केवल एक बार देखता है, और वह महासागरों या पहाड़ों को नहीं ढक सकता।

ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, समस्या को उलट देता है। हर आधुनिक विमान में उपग्रह नौवहन रिसीवर है और इसलिए वह अपनी स्थिति कुछ मीटर के भीतर जानता है। ADS-B बस विमान के ट्रांसपोंडर से वह स्थिति, उसकी पहचान, ऊँचाई और वेग के साथ, लगभग हर सेकंड दो बार, 1090 MHz पर, किसी खास को नहीं, घोषित करवाता है। Automatic (स्वचालित) क्योंकि कोई चीज़ इसे शुरू नहीं करती; dependent (निर्भर) क्योंकि सूचना पूरी तरह विमान के अपने उपकरणों से आती है; surveillance (निगरानी) क्योंकि इसका उद्देश्य यह जानना है कि विमान कहाँ हैं;

broadcast (प्रसारण) क्योंकि यह खुले रूप में हर सुनने वाले को भेजा जाता है। 2020 से यह यूरोपीय और अमेरिकी हवाई क्षेत्र के अधिकांश विमानों के लिए अनिवार्य है। नियंत्रक इसे रडार के साथ उपयोग करते हैं, दूसरे विमान इससे एक-दूसरे को देखते हैं, और स्कूल की छत पर रखा 25 यूरो का USB रिसीवर ठीक वही संदेश सुनता है।

प्रणाली को समझने के लिए पाँच चीज़ें समझनी होंगी, और हर एक एक पाठ है: वह विद्युत-चुंबकीय तरंग जो संदेश ले जाती है; वह समय-मापन जो विमान को उसकी स्थिति देता है, और जिससे नेटवर्क उस विमान को खोज सकता है जो नहीं बताता कि वह कहाँ है; डिजिटल संदेश और उसमें त्रुटियाँ कैसे पकड़ी जाती हैं; वह ज्यामिति और ऊर्जा जो सीमित करती है कि उसे कितनी दूर से सुना जा सकता है; और वह एंटीना और रिसीवर जो उसे वापस डेटा में बदलते हैं। पूरी कथा संदर्भ कोर्स में है; पाठ 3 से पहले उसके अध्याय 3 और 5 और पाठ 4 और 5 से पहले अध्याय 6 से 8 पढ़ लें।

पाठ 1

तरंग: अदृश्य प्रकाश के रूप में रेडियो

संदेश विमान से एक विद्युत-चुंबकीय तरंग के रूप में निकलता है: दोलन करते विद्युत और चुंबकीय क्षेत्र जो बिना माध्यम के अंतरिक्ष में प्रकाश की गति $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ से संचरित होते हैं। दृश्य प्रकाश वही परिघटना है, ऊँची आवृत्ति पर; आपकी आँखें लगभग $4 \text{ से } 8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ पर प्रतिक्रिया देती हैं, जबकि ADS-B $1.09 \times 10^9 \text{ Hz}$ पर प्रेषित होता है, पाँच लाख गुना कम। विमान के संदेश और इस स्क्रीन के प्रकाश में प्रकार का कोई अंतर नहीं है, केवल आवृत्ति का।

चूँकि तरंग एक निश्चित गति से चलती है, उसकी आवृत्ति उसका तरंगदैर्घ्य तय करती है। एक सेकंड में तरंग c मीटर आगे बढ़ती है और f चक्र पूरे करती है, इसलिए हर चक्र c / f मीटर घेरता है: $c = f \times \lambda$ । ADS-B के लिए $\lambda = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275 \text{ m}$ । विमान और आपके एंटीना के बीच से गुज़रती तरंग के शिखर 27.5 cm की दूरी पर हैं, स्पेक्ट्रम पर मोबाइल फ़ोन के संकेत (17 cm) और FM रेडियो स्टेशन (3 m) के बीच। वह स्पेक्ट्रम खुद बनाएँ, 10^6 Hz से 10^{18} Hz तक के लघुगुणकीय अक्ष पर, और उस पर FM रेडियो, ADS-B, मोबाइल फ़ोन, Wi-Fi, अवरक्त, दृश्य प्रकाश और X-किरणें रखें। विमान की तरंग आपकी जेब की चीज़ों के बीच बैठती है।

$$c = f \times \lambda$$

$$\text{जाँच: } 3.00 \times 10^8 \text{ m/s} = 1.09 \times 10^9 \text{ Hz} \times 0.275 \text{ m}$$

रेडियो तरंग जो नहीं है, वह है ध्वनि। ध्वनि किसी माध्यम में दाब-तरंग है, जो हवा में 343 m/s, पानी में 1 500 m/s से चलती है, और निर्वात में बिल्कुल नहीं। रेडियो प्रकाश है: उसे किसी माध्यम की ज़रूरत नहीं, और इसी तरह वह उपग्रह से विमान तक का निर्वात पार करता है, और वह $3.00 \times 10^8 / 343$, यानी लगभग 875 000 गुना तेज़ है। यदि 30 km दूर का विमान एक ही क्षण ध्वनि और संदेश छोड़े, तो संदेश 100 माइक्रोसेकंड में पहुँचता है; ध्वनि 87 सेकंड बाद पहुँचती है, तब तक विमान 22 km उड़ चुका है। रस्सी की तरंग प्रकाश के साथ वे गुण साझा करती है जो मायने रखते हैं, एक तरंगदैर्घ्य, एक आवृत्ति और एक निश्चित गति, जिससे तेज़ हिलाने का अर्थ छोटी तरंगें हैं, तेज़ तरंगें नहीं; वह इसमें अलग है कि उसे रस्सी चाहिए।

तरंग का एक गुण पाठ 5 में मायने रखेगा: उसका ध्रुवीकरण (polarisation)। विद्युत क्षेत्र गति की दिशा के लंबवत एक निश्चित दिशा में दोलन करता है। विमान के एंटीना ऊर्ध्वाधर हैं, इसलिए ADS-B तरंग ऊर्ध्वाधर रूप से ध्रुवित है, और करवट लिटाया हुआ प्राप्त करने वाला एंटीना उसका लगभग कुछ नहीं पकड़ता, जैसे ऊर्ध्वाधर हिलाई रस्सी की तरंग क्षैतिज झिरी से रुक जाती है। अभी पूर्वानुमान लगाएँ कि एंटीना क्षैतिज होने पर आपके रिसीवर की सीमा का क्या होगा; आप इसे परियोजना में परखेंगे।

पाठ 2

समय-मापन और स्थिति: विमान कैसे जानता है कि वह कहाँ है

हर ADS-B संदेश की स्थिति उपग्रह नौवहन से आती है, और उपग्रह नौवहन समय का माप है। हर प्रणाली (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) के लगभग तीस उपग्रह लगभग 20 200 km पर परिक्रमा करते हैं, हर एक के पास परमाणु घड़ी है, और हर एक ऐसा संकेत भेजता है जो उसकी अपनी स्थिति और प्रेषण का ठीक क्षण बताता है। विमान का रिसीवर आगमन का क्षण नोट करता है। अंतर, c से गुणा करने पर, उस उपग्रह की दूरी है; ठीक सिर के ऊपर से संकेत को $20\,200 / 300\,000 = 0.0673\text{ s}$ लगते हैं। एक दूरी रिसीवर को उस उपग्रह के चारों ओर एक गोले पर रखती है; दो गोले एक वृत्त में मिलते हैं; तीन दो बिंदुओं में, जिनमें से एक पृथ्वी से दूर है और छोड़ दिया जाता है। तीन उपग्रह पर्याप्त होते यदि रिसीवर के पास पूर्ण घड़ी होती। उसके पास क्वार्ट्ज क्रिस्टल है जो माइक्रोसेकंडों में बहकता है, और एक माइक्रोसेकंड 300 m दूरी है। इसलिए रिसीवर अपनी घड़ी की त्रुटि को चौथे अज्ञात की तरह लेता है और चौथे उपग्रह का उपयोग करता है: चार समीकरण, चार अज्ञात (x, y, z और घड़ी का ऑफ़सेट), लगातार हल किए जाते हुए। उप-उत्पाद के रूप में हर उपग्रह रिसीवर दसियों नैनोसेकंड तक समय रखता है, जिस पर इस पाठ का दूसरा आधा हिस्सा निर्भर है।

परिमाण पकड़े रखें: प्रकाश प्रति नैनोसेकंड 0.3 m और प्रति माइक्रोसेकंड 300 m चलता है। 3 m तक सटीक स्थिति का अर्थ है 10 ns तक सटीक समय-मापन। जिस उपग्रह की घड़ी 1 माइक्रोसेकंड आगे चले, वह उसका उपयोग करने वाले हर रिसीवर को उसकी ओर की रेखा पर 300 m खिसका देगा, और इसीलिए उपग्रहों की घड़ियाँ दिन में कई बार ज़मीन से सुधारी जाती हैं।

विमान दो ऊँचाइयाँ रखता है। उपग्रह का हल संदर्भ दीर्घवृत्त के ऊपर एक ज्यामितीय ऊँचाई देता है। पर जो ऊँचाई वह हवाई यातायात के लिए प्रसारित करता है वह वायुदाब-आधारित है: धड़ पर एक पोर्ट पर हवा का दाब, जिसे अंतरराष्ट्रीय मानक वायुमंडल के ज़रिए ऊँचाई में बदला जाता है, जो समुद्र तल पर 1013.25 hPa और 15 डिग्री C, और प्रति किलोमीटर 6.5 डिग्री की गिरावट मानता है। जब वास्तविक दाब मानक से भिन्न हो, हर विमान की वायुदाब-आधारित ऊँचाई एक ही मात्रा से गलत होती है, जो ठीक वही है जो पृथक्करण को चाहिए: फ़्लाइट लेवल 350 और 360 पढ़ने वाले दो विमान मौसम चाहे जो हो 1 000 ft दूर हैं। स्थिति-संदेश 25-फ़ीट के चरणों में वायुदाब-आधारित ऊँचाई ले जाता है; वेग-संदेश वायुदाब-आधारित और ज्यामितीय ऊँचाई का अंतर ले जाता है। यदि आपके पास स्प्रेडशीट है, तो $p = p_0 (1 - 0.0065\text{ h} / 288.15)^{5.255}$ को उलटें और जाँचें कि 11 000 m पर दाब लगभग 227 hPa है, समुद्र तल के चौथाई से भी कम: जिस हवा में यात्री विमान उड़ता है, वह आपको होश में नहीं रख पाती।

अब पूरे विचार को उलट दें। कुछ विमान 1090 MHz पर बिना स्थिति के प्रेषण करते हैं: पुराने ट्रांसपोंडर जो रडार को केवल पहचान और ऊँचाई से उत्तर देते हैं, या ऐसे विमान जिनका उपग्रह ग्रहण जाम है। रिसीवरों का नेटवर्क फिर भी उन्हें मल्टीलैटरेशन (multilateration) से खोज सकता है। मान लीजिए मिलाई हुई घड़ियों वाले चार रिसीवर, हर एक, एक ही प्रेषण का आगमन-समय दर्ज करते हैं। जो संदेश रिसीवर B से एक माइक्रोसेकंड पहले रिसीवर A तक पहुँचा, वह B की तुलना में A से 300 m अधिक पास के बिंदु से भेजा गया, और ऐसे सभी बिंदु एक अतिपरवलयज (hyperboloid) बनाते हैं जिसकी नाभियाँ A और B हैं। चार रिसीवरों से तीन स्वतंत्र जोड़े तीन अतिपरवलयज देते हैं, जो विमान पर प्रतिच्छेद करते हैं। यह उपग्रह की समस्या है जिसमें ज्ञात और अज्ञात बदल दिए गए हैं: वहाँ, एक रिसीवर और चार ज्ञात प्रेषक; यहाँ, एक प्रेषक और चार ज्ञात रिसीवर। दोनों में जो मापा जाता है वह समय है, और 1 माइक्रोसेकंड 300 m है। रिसीवर अपनी घड़ियाँ उन्हीं उपग्रहों से लगभग 100 ns तक मिलाते हैं जिनका विमान उपयोग करता है।

आप इसे ध्वनि से कर सकते हैं। खेल के मैदान के सर्वेक्षित बिंदुओं पर स्टॉपवॉच लिए तीन लोग; एक चौथा, छिपा हुआ, एक बार ताली बजाता है; हर एक देरी दर्ज करता है। 343 m/s की ध्वनि के साथ 0.1 s का अंतर 34 m है, और परीक्षण-स्थितियों वाला पैमाने का चित्र, या अतिपरवलयों का रेखाचित्र, ताली बजाने वाले को खोज लेता है। फिर पूछें कि 200 km पर रेडियो

से यही करने के लिए स्टॉपवॉचों को कितनी परिशुद्धता चाहिए, और आप समझ जाएंगे कि नेटवर्क को परमाणु समय क्यों चाहिए।

पाठ 3

संदेश: 112 बिट, और त्रुटियाँ कैसे पकड़ी जाती हैं

ट्रांसपोंडर ADS-B को Mode S एक्सटेंडेड स्क्विटर के रूप में भेजता है: 8 माइक्रोसेकंड की प्रस्तावना (preamble), फिर एक बिट प्रति माइक्रोसेकंड पर 112 डेटा बिट। प्रस्तावना 0, 1, 3.5 और 4.5 माइक्रोसेकंड पर चार स्पंदों का एक निश्चित पैटर्न है, और उसका काम एक ऐसे प्रश्न का उत्तर देना है जो शायद आपने पूछने के बारे में सोचा न हो: शोर और दूसरे विमानों से भरे चैनल में रिसीवर कैसे जानता है कि संदेश शुरू हो गया है, और हर बिट कब शुरू होता है? डिकोडर लगातार उस पैटर्न को देखता रहता है, और जब वह दिखता है, तो वह दोनों जान लेता है। आपके उपयोग के हर डिजिटल प्रोटोकॉल में, Wi-Fi से QR कोड तक, इसका समकक्ष है।

प्रेषक चालू या बंद हो सकता है; वह 1 या 0 कैसे भेजता है? ADS-B पल्स पोज़िशन मॉड्युलेशन (pulse position modulation) का उपयोग करता है। एक माइक्रोसेकंड के हर बिट-खाने को दो हिस्सों में बाँटा जाता है: पहले हिस्से में स्पंद और दूसरे में मौन 1 है; मौन फिर स्पंद 0 है। हर बिट में हमेशा ठीक एक स्पंद होता है। सोचिए कि यह "स्पंद का अर्थ 1, स्पंद नहीं तो 0" से बेहतर क्यों है। रिसीवर अपनी घड़ी-ताल कभी नहीं खोता, शून्यों की लंबी कतार में भी, जो सरल योजना में मौन से अलग पहचानी नहीं जा सकती। और वह हर बिट यह पूछकर तय करता है कि कौन-सा आधा हिस्सा ज़्यादा तेज़ था, न कि यह कि स्पंद किसी निश्चित स्तर को पार कर गया या नहीं, इसलिए 400 km से आया क्षीण संकेत उतनी ही भरोसेमंद ढंग से डिकोड होता है जितना सिर के ऊपर से आया सशक्त संकेत।

पल्स पोज़िशन मॉड्युलेशन में चार बिट: 1, 0, 1, 1



हर खाना 1 माइक्रोसेकंड का है। पहले आधे हिस्से में स्पंद: 1। दूसरे आधे हिस्से में स्पंद: 0।

112 बिट इस तरह जमे हैं, और आपको इसे स्मृति से दोहरा पाना चाहिए। बिट 1 से 5: डाउनलिंक फ़ॉर्मेट, ट्रांसपोंडर से ADS-B के लिए 17। बिट 6 से 8: एक क्षमता कोड। बिट 9 से 32: 24-बिट का ICAO पता, विमान की स्थायी पहचान, पंजीकरण पर दी हुई; ऐसे $2^{24} = 16\,777\,216$ पते हैं, जो देशों को खंडों में आवंटित हैं, बेल्जियम का खंड हेक्साडेसिमल में 448000 से 44FFFF है। बिट 33 से 88: 56-बिट का संदेश फ़ील्ड, जिसके पहले पाँच बिट, टाइप कोड, बताते हैं कि बाकी 51 में क्या है। टाइप कोड 1 से 4 कॉल साइन को आठ 6-बिट अक्षरों के रूप में ले जाते हैं, हर एक में 64 प्रतीक। टाइप कोड 9 से 18 हवा में स्थिति ले जाते हैं: 25-फ़ीट के चरणों में वायुदाब-आधारित ऊँचाई के 12 बिट, एक सम/विषम फ़्लैग, और कोडित अक्षांश और देशांतर के 17-17 बिट। टाइप कोड 19 वेग को भू-गति के पूर्व-पश्चिम और उत्तर-दक्षिण घटकों, ऊर्ध्वाधर दर और वायुदाब-आधारित और ज्यामितीय ऊँचाई के अंतर के रूप में ले जाता है। बिट 89 से 112: 24-बिट समता (parity)। गणित जाँचें: 25 ft पर ऊँचाई के 12 बिट 102 400 ft ढकते हैं; अक्षांश के 180 डिग्री पर सीधे-सीधे उपयोग किए 17 बिट केवल 1.4 km का विभेदन देंगे। स्थिति इससे बेहतर है कॉम्पैक्ट पोज़िशन रिपोर्टिंग (CPR) की वजह से: 17 बिट एक क्षेत्र के भीतर कुछ मीटर तक स्थिति देते हैं, यह नहीं कि कौन-सा क्षेत्र, और विमान दो क्षेत्र-ग्रिड, सम और विषम, के बीच बारी-बारी बदलता है। जिस रिसीवर ने दोनों में से एक-एक सुन लिया हो, वह क्षेत्र को बिना संदेह निकाल लेता है और फिर अकेले संदेशों से पीछा करता है। उन्हीं बिट से अधिक परिशुद्धता, समय की कीमत पर खरीदी हुई।

DF	CA	ICAO पता	ME - वास्तविक सामग्री	PI
5 बिट डाउनलैंक फॉर्मेट	3 बिट क्षमता	24 बिट विमान की अद्वितीय पहचान	56 बिट स्थिति, ऊँचाई, वेग, कॉल साइन या स्थिति-सूचना, इसके पहले 5 बिट के टाइप कोड के अनुसार	24 बिट त्रुटि-जाँच (CRC)

इस पृष्ठ के ऊपर के वास्तविक संदेश की चीर-फाड़ करें। 8D4840D6202CC371C32CE0576098 28 हेक्साडेसिमल अंक है, 112 बिट। पहले दो अंक, 8D, द्विआधारी में 1000 1101 हैं; पहले पाँच बिट, 10001, 17 हैं, इसलिए यह ट्रांसपोंडर से ADS-B है, और अगले तीन, 101, क्षमता 5 देते हैं। अगले छह अंक, 4840D6, ICAO पता हैं, जिसे आवंटन तालिकाएँ नीदरलैंड्स में रखती हैं। अगला अंक-युग्म, 20, 00100 से शुरू होता है, टाइप कोड 4, एक पहचान संदेश, और उसके बाद के 6-बिट अक्षरों को डिकोड करने पर कॉल साइन KLM1023 मिलता है। अंतिम छह अंक, 576098, समता हैं। स्प्रेडशीट या कोड की कुछ पंक्तियों से आप पूरा डिकोड कर सकते हैं, और हेक्स की एक पंक्ति देखकर यह कह पाना कि "KLM का एक विमान उड़ान 1023 की घोषणा कर रहा है", इस पाठ का लक्ष्य है।

समता सबसे अधिक सोचने लायक है। व्यस्त हवाई अड्डे के ऊपर अलग-अलग विमानों के प्रेषण रिसीवर पर लगातार एक-दूसरे पर चढ़ते हैं, और अकेले स्पंद शोर में खो जाते हैं; डिकोडर कभी-कभी अनिवार्य रूप से गलत बिट जोड़ेगा। अंतिम 24 बिट एक चक्रीय अतिरिक्त जाँच (cyclic redundancy check) हैं: 88 संदेश बिट को एक लंबी द्विआधारी संख्या माना जाता है और उसे एक ऐसे अंकगणित में, जिसमें घटाना exclusive-or है, एक निश्चित 25-बिट जनक बहुपद (generator polynomial) से भाग दिया जाता है; शेषफल CRC है। रिसीवर अपने डिकोड किए बिट पर भाग दोहराता है। कोई भी एक पलटा बिट, कोई भी दो, और 24 बिट तक लंबा त्रुटियों का कोई भी झोंका शेषफल बदल देता है, और संदेश अस्वीकार हो जाता है। तंत्र देखने के लिए 8-बिट संदेश पर हाथ से 4-बिट CRC आजमाएँ, फिर, यदि आप प्रोग्राम करते हैं, तो असली CRC-24 लागू करें और सत्यापित करें कि उदाहरण संदेश पास होता है और किसी भी एक बिट को पलटने से वह विफल हो जाता है। यह त्रुटि-पहचान है जैसी हर आधुनिक प्रणाली करती है, एक ऐसे संदर्भ में जहाँ चूकी हुई त्रुटि नियंत्रक के स्क्रीन पर एक प्रेत विमान रख सकती है।

पाठ 4

सीमा: पृथ्वी की गोलाई और व्युत्क्रम वर्ग नियम

रिसीवर विमान को कितनी दूर से सुन सकता है? दो अलग सीमाएँ लागू होती हैं, और उन्हें अलग रखना सार्थक है। पहली ज्यामितीय है। 1090 MHz पर रेडियो पृथ्वी के चारों ओर नहीं मुड़ता; वह सीधी रेखा में चलता है, इसलिए रिसीवर केवल अपने क्षितिज के ऊपर के विमान सुनता है, वे जिनसे एंटीना तक की सीधी रेखा ज़मीन से नहीं टकराती। क्षितिज की दूरी व्युत्पन्न करें। त्रिज्या R के गोले के ऊपर ऊँचाई h पर रखा एंटीना क्षितिज वहाँ देखता है जहाँ उसकी दृष्टि-रेखा गोले की स्पर्श-रेखा है; स्पर्श-रेखा और दोनों त्रिज्याएँ स्पर्श-बिंदु पर समकोण बनाती हैं, इसलिए $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, जिससे $d^2 = 2Rh + h^2$, और चूँकि h, R के सामने नगण्य है, $d = \sqrt{2Rh}$ । R = 6 371 km और h मीटर में लेने पर, $d \text{ (km)} = 3.57 \sqrt{h}$ । वायुमंडल रेडियो को थोड़ा नीचे की ओर मोड़ता है क्योंकि उसका अपवर्तनांक ऊँचाई के साथ घटता है; मानक सुधार पृथ्वी को ऐसे मानता है जैसे उसकी त्रिज्या वास्तविक से चार-तिहाई हो, जिससे 3.57 की जगह 4.12 आ जाता है। ऊँचाई h1 पर एंटीना से ऊँचाई h2 पर विमान तक की पूरी दृष्टि-रेखा दोनों क्षितिज दूरियों का योग है:

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad h_1, h_2 \text{ मीटर में}$$

20 m ऊँची छत पर एंटीना, विमान 11 000 m पर: $4.12 \times (4.47 + 104.9) = 451 \text{ km}$ । वही एंटीना, विमान 1 000 m पर: 149 km। 30 km दूर रनवे पर खड़ा विमान: $4.12 \times (4.47 + 2) = 27 \text{ km}$, इसलिए मौन।



अपने एंटीना की ऊँचाई के लिए d को h^2 के सापेक्ष प्लॉट करें। वक्र पहले खड़ा है और फिर चपटा हो जाता है, और यह हर रिसीवर के कवरेज के आकार को समझाता है: कूज़ यातायात के लिए 400 km और अधिक, उतरते विमानों के लिए कुछ दसियों किलोमीटर, ज़मीन पर कुछ नहीं सिवाय बगल के हवाई अड्डे के। यह समझाता है कि ऊँचाई रिसीवर का सबसे महत्वपूर्ण गुण क्यों है, और क्यों एक पहाड़ी, एक इमारत, या विमान का अपना पंख जब वह दूर की ओर झुकता है, ट्रैक को तुरंत काट सकता है।

दूसरी सीमा ऊर्जा है। ट्रांसपोंडर कुछ सौ वाट विकीर्ण करता है, सभी क्षैतिज दिशाओं में लगभग समान रूप से। दूरी d पर वह शक्ति $4 \pi d^2$ क्षेत्रफल के गोले पर फैली है, इसलिए निश्चित प्रभावी क्षेत्रफल के एंटीना द्वारा पकड़ी गई शक्ति $1 / d^2$ के अनुसार घटती है: व्युत्क्रम वर्ग नियम, जिसे आपको रटने के बजाय गोले के क्षेत्रफल से व्युत्पन्न करना चाहिए। दुगुनी दूरी, चौथाई शक्ति; दस गुनी, सौवाँ हिस्सा। इंजीनियर क्षय को डेसिबल में व्यक्त करते हैं, जहाँ 10 dB शक्ति में दस का गुणक है और 3 dB दो का, क्योंकि डेसिबल परिमाण की कई कोटियों के गुणन को जोड़ में बदल देते हैं। दो सरल एंटीना के बीच मुक्त-आकाश पथ क्षय है:

$$P_r \text{ (dB)} = 20 \log_{10}(d \text{ km}) + 20 \log_{10}(f \text{ MHz}) + 32.44$$

400 km और 1090 MHz पर: $52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 \text{ dB}$ । 250 W का प्रेषक +54 dBm है; प्राप्त शक्ति $54 - 145 = -91 \text{ dBm}$, लगभग $8 \times 10^{-13} \text{ W}$ ।

यह संख्या ठहरने लायक है: छत पर रखा रिसीवर ऐसे संकेत को पकड़ रहा है जो विमान से निकले संकेत से $10^{14.5}$ गुना कमज़ोर है, एक वाट का दस लाखवें का दस लाखवाँ हिस्सा। एक अच्छा शौकिया रिसीवर लगभग -100 dBm तक डिकोड करता है, इसलिए 400 km पर 9 dB की गुंजाइश है। दूसरे शब्दों में, कूज़ पर उड़ते यात्री विमान के लिए ऊर्जा की सीमा और ज्यामितीय क्षितिज एक ही जगह पड़ते हैं, और यह रचना से है: ट्रांसपोंडर की शक्ति और रिसीवर के मानक इस तरह निर्धारित किए गए थे कि विमान अपने क्षितिज तक सुनाई दे और उससे बहुत आगे नहीं, जिससे चैनल पड़ोसी देश के यातायात से भर न जाए।

दो परिष्कार। डॉप्लर: 250 m/s से पास आता विमान प्राप्त आवृत्ति को $f_v / c = 1.09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908 \text{ Hz}$ खिसकाता है, दस लाख में एक हिस्से से कम, जिसे रिसीवर कभी नहीं देखता; इसकी तुलना उसी विमान की ध्वनि से करें, जहाँ $v / c = 250 / 343$ है और गुज़रते समय स्वर लगभग एक सप्तक गिर जाता है। और उड़ान-समय: 400 km c पर 1.33 ms है, इसलिए प्रसारित स्थिति पहुँचने पर पहले से 1.33 ms पुरानी है, जिस दौरान विमान 33 cm चल चुका है; मैप के लिए नगण्य, मल्टीलैटरेशन के लिए निर्णायक, जो ठीक इन्हीं माइक्रोसेकंडों पर जीता है।

पाठ 5

एंटीना और रिसीवर: 27 सेंटीमीटर की तरंग से मैप पर एक बिंदु तक

एंटीना एक चालक है जिसमें गुजरती विद्युत-चुंबकीय तरंग प्रत्यावर्ती धारा प्रेरित करती है, और वही उपकरण, धारा से चलाया जाए तो, तरंग छोड़ता है; प्राप्त करने वाले और प्रेषण करने वाले एंटीना एक ही चीज़ हैं, उल्टी दिशा में चलाई हुई। प्रेरित धारा अनुनाद (resonance) पर सबसे बड़ी होती है, जब चालक की लंबाई उसके साथ धारा के वितरण को तरंग के दोलन में बैठने देती है, जैसे सही लंबाई का तार किसी खास स्वर के साथ अनुनाद करता है। सीधे चालक का मूल अनुनाद आधे तरंगदैर्घ्य पर है, 1090 MHz पर 13.75 cm, जिसमें धारा केंद्र में सबसे अधिक और सिरों पर शून्य है। व्यावहारिक ADS-B एंटीना, विमानों पर और अधिकांश रिसीवरों पर, एक चौथाई-तरंग मोनोपोल है: चालक ग्राउंड प्लेन पर 6.9 cm का एक ऊर्ध्वाधर अवयव, जिसे ग्राउंड प्लेन प्रतिबिंबित करता है ताकि अवयव और प्रतिबिंब मिलकर आधी-तरंग का द्विध्रुव बनाएँ। विमान पर धड़ ग्राउंड प्लेन है; खरीदा हुआ 1090 MHz एंटीना वही ज्यामिति अपनी नली के भीतर छिपाए रखता है, कई बार एक के ऊपर एक जमाई हुई। घर पर बना एंटीना कुछ मिलीमीटर की गलती से बेसुरा हो जाता है और आसमान का एक अंश ही सुनता है, इसीलिए परियोजना का रिसीवर कारखाने में ट्यून किया हुआ एंटीना इस्तेमाल करता है।

ऊर्ध्वाधर मोनोपोल क्षितिज की ओर सबसे अधिक संवेदनशील है और अपनी धुरी के साथ बिल्कुल नहीं; तीन आयामों में उसकी संवेदनशीलता एक छल्लेदार डोनट है जिसके छेद से एंटीना गुजरता है। इसलिए आपका रिसीवर 300 km दूर के विमानों को पूरी तरह सुनेगा और ठीक सिर के ऊपर से गुजरते विमान को कुछ सेकंड के लिए खो देगा, और आप इसे होते देख सकते हैं। एक समरेख (collinear) एंटीना, जिसमें कई अनुनादी अवयव एक के ऊपर एक जमे हैं, डोनट को चपटा करता है और सिर के ऊपर के छेद की कीमत पर क्षितिज पर संवेदनशीलता बढ़ाता है: यही एंटीना का लाभ (gain) है, जो dBi में मापा जाता है, और यह संवेदनशीलता के पुनर्वितरण से आता है, उसके सृजन से कभी नहीं। और पाठ 1 से, एंटीना ऊर्ध्वाधर होना चाहिए, क्योंकि तरंग ऊर्ध्वाधर रूप से ध्रुवित है।

एंटीना और मैप पर एक बिंदु के बीच चार चरण हैं। एक बैंड-पास फ़िल्टर 1090 MHz को गुज़रने देता है और कुछ सौ मेगाहर्ट्ज़ दूर के कहीं अधिक सशक्त मोबाइल फ़ोन संकेतों को रोकता है जो वरना अपने बाद की हर चीज़ को संतुप्त कर देते। एंटीना पर लगा निम्न-शोर प्रवर्धक केबल से पहले संकेत को हज़ार गुना कर देता है, क्योंकि केबल 1090 MHz पर हर दस मीटर पर लगभग 3 dB, आधा संकेत, खो देती है; केबल के बाद प्रवर्धन करें तो केबल का शोर भी प्रवर्धित होता है। एक सॉफ़्टवेयर-परिभाषित रेडियो, 20 यूरो का USB उपकरण जो मूलतः टेलीविज़न ट्यूनर के रूप में बिकता था, संकेत को मिलाकर नीचे लाता है और प्रति सेकंड बीस लाख बार नमूने लेकर उसे संख्याओं की धारा बनाता है। यहाँ से आगे यह प्रोग्रामिंग है: मुफ़्त सॉफ़्टवेयर नमूनों में प्रस्तावना खोजता है, मापता है कि हर माइक्रोसेकंड के खाने का कौन-सा आधा हिस्सा अधिक ऊर्जा रखता है, 112 बिट जोड़ता है, CRC निकालता है और, यदि वह पास हो, तो फ़िल्ड डिकोड करता है। फिर एक ट्रैकर सम और विषम स्थिति-फ्रेमों की जोड़ी बनाता है, ICAO पते से स्थिति, वेग और पहचान को मिलाता है, और हर विमान की अवस्था तब तक रखता है जब तक संदेश आने बंद न हो जाएँ, प्रायः इसलिए कि वह क्षितिज के नीचे चला गया है।

वह श्रृंखला बनाएँ, हर चरण की राशि के साथ: एंटीना पर नैनोवोल्ट, प्रवर्धक के बाद माइक्रोवोल्ट, रेडियो से प्रति सेकंड बीस लाख नमूने, डिकोडर से प्रति सेकंड कुछ सौ फ्रेम, ट्रैकर से प्रति विमान एक रिकॉर्ड। मैप पर बिंदु एक ऐसी श्रृंखला का दूर वाला सिरा है जिसकी हर कड़ी इस कोर्स का एक विचार है: अनुनाद, फ़िल्टरिंग, प्रवर्धन, नमूना-ग्रहण, पैटर्न मिलान, डिकोडिंग, त्रुटि-जाँच, एकत्रीकरण। परियोजना है श्रृंखला बनाना और कोर्स को आसमान के सामने परखना: अपनी अधिकतम दूरी को ऊँचाई के सापेक्ष मापें और क्षितिज के सूत्र से तुलना करें; एंटीना की तुलना करें घर के अंदर, खिड़की पर और छत पर, ऊर्ध्वाधर और क्षैतिज; एक दिन का यातायात दर्ज करें और सबसे व्यस्त घंटा और सामान्य कूज़ ऊँचाई खोजें; कच्चे संदेश डिकोड करें और अपने कोड में उनका CRC सत्यापित करें। और फिर वे प्रश्न पूछें जो प्रणाली उठाती है और जिनका उत्तर नहीं देती: संदेश

अहस्ताक्षरित हैं, तो किसी को एक प्रेत विमान प्रसारित करने से क्या रोकता है; विमान ऐसे उपग्रहों पर निर्भर है जिन्हें जाम किया जा सकता है, तो जब वे जाम हों तो नियंत्रक क्या देखता है; और डेटा विमानों की पहचान बताता है, जो लोगों की पहचान बता सकती है, तो किसे किसका पीछा करने की अनुमति होनी चाहिए।

चुनौतियाँ

हर एक को पहले कागज़ पर हल करें। जाँच उत्तर और तर्क दिखाती है।

1. 1. 1090 MHz संकेत का तरंगदैर्घ्य क्या है, और उसके लिए चौथाई-तरंग एंटीना कितना लंबा है?

2. 2. संदेश ध्वनि से कितने गुना तेज़ है? 30 km दूर का विमान दोनों एक साथ छोड़ता है; ध्वनि के पहुँचने तक वह कितना उड़ चुका है?

3. 3. रिसीवर की घड़ी 2 माइक्रोसेकंड गलत है। इससे दूरी में कितनी त्रुटि आती है, और उपग्रह रिसीवर को तीन के बजाय चार उपग्रह क्यों चाहिए?

4. 4. पते के 24 बिट कितने विमानों की पहचान कर सकते हैं? 1 बिट प्रति माइक्रोसेकंड पर 112-बिट का संदेश कितनी देर चलता है, और प्रस्तावना सहित पूरा प्रेषण?

5. 5. संदेश 8D4840D6... में डाउनलॉक फ़ॉर्मेट और क्षमता क्या हैं, और ICAO पता क्या है?

6. 6. प्राप्त करने वाला एंटीना 15 m ऊपर है। 9 000 m पर उड़ते विमान तक रेडियो क्षितिज क्या है, और 300 m पर उड़ते विमान तक?

7. 7. दूरी दुगुनी करने से प्राप्त शक्ति चौथाई क्यों हो जाती है? 200 km पर पथ क्षय क्या है, और 400 km के 145 dB से उसकी तुलना कैसी है?

8. 8. पूर्वानुमान लगाएँ कि एंटीना को क्षैतिज लिटाने पर सीमा का क्या होगा, और रिसीवर को छत से भूतल पर ले जाने पर।

आगे

इसे बनाएँ

इन पाठों की हर बात एक खिड़की से जाँची जा सकती है। व्यावहारिक कार्यशाला आपको खरीदारी की सूची देती है (लगभग 100 से 150 यूरो, या वह Raspberry Pi जो आपके पास पहले से है), कौन-सा एंटीना चुनें और उसे कहाँ रखें, Dataero फ़्रीडर स्थापित करने वाली तीन कमांड, और वे माप जो सूत्रों को असली विमानों के सामने परखते हैं: रेडियो क्षितिज, व्युत्क्रम वर्ग नियम, दैनिक लय। जब आपका रिसीवर मैप को फ़्रीड करता है, तो वह जिस विमान को सुनता है वह सबके लिए खींचा जाता है, आपके स्टेशन के नाम के साथ।

व्यावहारिक कार्यशाला खोलें <https://radar.dataero.eu/hi/learning/workshop>

उत्तर

1. 1090 MHz संकेत का तरंगदैर्घ्य क्या है, और उसके लिए चौथाई-तरंग एंटीना कितना लंबा है?
 $\lambda = c / f = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275 \text{ m}$ । चौथाई-तरंग अवयव 6.9 cm है। प्रकाश की निश्चित गति आवृत्ति और तरंगदैर्घ्य को व्युत्क्रम रूप से संबंधित होने को बाध्य करती है।
2. संदेश ध्वनि से कितने गुना तेज़ है? 30 km दूर का विमान दोनों एक साथ छोड़ता है; ध्वनि के पहुँचने तक वह कितना उड़ चुका है?
 $3.00 \times 10^8 / 343 = \text{लगभग } 875\,000 \text{ गुना}$ । संदेश 100 माइक्रोसेकंड में पहुँचता है, ध्वनि 87 s में, जिस दौरान 250 m/s पर विमान 22 km उड़ता है।
3. रिसीवर की घड़ी 2 माइक्रोसेकंड गलत है। इससे दूरी में कितनी त्रुटि आती है, और उपग्रह रिसीवर को तीन के बजाय चार उपग्रह क्यों चाहिए?
 $2 \times 10^{-6} \text{ s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 600 \text{ m}$ । तीन उपग्रह x, y और z तभी तय करते हैं जब घड़ी पूर्ण हो; घड़ी का ऑफ़सेट चौथा अज्ञात है, इसलिए चौथा उपग्रह चाहिए।
4. पते के 24 बिट कितने विमानों की पहचान कर सकते हैं? 1 बिट प्रति माइक्रोसेकंड पर 112-बिट का संदेश कितनी देर चलता है, और प्रस्तावना सहित पूरा प्रेषण?
 $2^{24} = 16\,777\,216$ । डेटा 112 माइक्रोसेकंड चलता है; 8 माइक्रोसेकंड की प्रस्तावना के साथ, 120 माइक्रोसेकंड।
5. संदेश 8D4840D6... में डाउनलैंक फ़ॉर्मेट और क्षमता क्या हैं, और ICAO पता क्या है?
 8D = 1000 1101। पहले पाँच बिट 10001 = 17: DF 17, Mode S ट्रांसपोंडर से ADS-B। अगले तीन बिट 101 = 5: CA 5। ICAO पता 4840D6 है, नीदरलैंड्स को आवंटित।
6. प्राप्त करने वाला एंटीना 15 m ऊपर है। 9 000 m पर उड़ते विमान तक रेडियो क्षितिज क्या है, और 300 m पर उड़ते विमान तक?
 $d = 4.12 \times (\sqrt{15} + \sqrt{9000}) = 4.12 \times (3.87 + 94.9) = 407 \text{ km}$ । 300 m के लिए: $4.12 \times (3.87 + 17.3) = 87 \text{ km}$ ।
7. दूरी दुगुनी करने से प्राप्त शक्ति चौथाई क्यों हो जाती है? 200 km पर पथ क्षय क्या है, और 400 km के 145 dB से उसकी तुलना कैसी है?
 प्रेषित शक्ति $4 \pi d^2$ क्षेत्रफल के गोले पर फैलती है, जो दुगुनी दूरी पर चार गुना बढ़ा है। 200 km पर: $20 \log_{10}(200) + 20 \log_{10}(1090) + 32.44 = 46.0 + 60.7 + 32.4 = 139 \text{ dB}$, 400 km से 6 dB (चार का गुणक) कम।
8. पूर्वानुमान लगाएँ कि एंटीना को क्षैतिज लिटाने पर सीमा का क्या होगा, और रिसीवर को छत से भूतल पर ले जाने पर।
 क्षैतिज: एंटीना ऊर्ध्वाधर तरंग के प्रति क्रॉस-ध्रुवित है; प्रेरित धारा चालक के साथ क्षेत्र के घटक पर निर्भर करती है, इसलिए वह बहुत कम सुनता है। भूतल: क्षितिज पद $4.12 \sqrt{h1}$ सिकुड़ जाता है और इमारतें दृष्टि-रेखा रोक देती हैं, इसलिए सीमा तेज़ी से गिरती है, खासकर नीचे उड़ते विमानों के लिए।