

संदर्भ कोर्स - किसी भी वयस्क के लिए

# ADS-B क्या है और कैसे काम करता है

बारह अध्याय। विमानन या रेडियो का कोई पूर्व ज्ञान आवश्यक नहीं है; हल किए हुए उदाहरणों के लिए माध्यमिक स्कूल का गणित पर्याप्त है, और उन्हें छोड़ देने पर भी सूत्र नहीं टूटता। पढ़ने का समय लगभग 50 मिनट।

सीखें - <https://radar.dataero.eu/hi/learning/course> 2026-10-22

## विषय-सूची

अध्याय 1 समस्या: विमानों से भरा आसमान, जिन्हें कोई देख नहीं सकता

अध्याय 2 ADS-B से पहले: रडार से विमान खोजना

अध्याय 3 मूल विचार: विमान को खुद बताने दो

अध्याय 4 विमान कैसे जानता है कि वह कहाँ है

अध्याय 5 एक संदेश की संरचना

अध्याय 6 - भौतिकी तरंग: अदृश्य प्रकाश के रूप में रेडियो

अध्याय 7 - भौतिकी सीमा: पृथ्वी की गोलाई और संकेत का क्षीण होना

अध्याय 8 - भौतिकी एंटीना: 27 सेंटीमीटर की तरंग को पकड़ना

अध्याय 9 ग्रहण और डिकोडिंग

अध्याय 10 एक रिसीवर से एक महाद्वीप के मैप तक

अध्याय 11 इसका उपयोग किसलिए होता है, और यह कहाँ कम पड़ता है

अध्याय 12 एक संक्षिप्त इतिहास

शब्दावली

आगे सिद्धांत से व्यवहार तक: रिसीवर बनाएँ

## अध्याय 1

### समस्या: विमानों से भरा आसमान, जिन्हें कोई देख नहीं सकता

एक साधारण कार्यदिवस पर लगभग 30,000 उड़ानें यूरोपीय हवाई क्षेत्र को पार करती हैं। क्लृप्त पर उड़ता यात्री विमान लगभग 250 मीटर प्रति सेकंड, यानी 900 km/h की गति से चलता है; एक-दूसरे की ओर आते दो विमान हर सेकंड आधा किलोमीटर पास आ जाते हैं। खिड़की से बाहर देखता पायलट इसमें से लगभग कुछ नहीं देखता: 10,000 मीटर पर दूसरे विमान बस बिंदु भर हैं, और वैसे भी बादल उनमें से अधिकांश को छिपा लेते हैं। आसमान एक त्रिआयामी सड़क-जाल है जिस पर कोई सड़क बनी नहीं है, और उस पर चलने वाला यातायात तेज़ भी है और अदृश्य भी।

हवाई यातायात नियंत्रण (air traffic control) इसी यातायात को एक-दूसरे से दूर रखने के लिए है। नियम सिद्धांत रूप में सरल हैं: नियंत्रित हवाई क्षेत्र में विमानों को ऊर्ध्वाधर दिशा में कम से कम 1,000 फ़ीट (लगभग 300 मीटर) दूर रखा जाता है, या क्षैतिज दिशा में एक निर्धारित दूरी पर, रडार कवरेज के पास आम तौर पर 5 समुद्री मील (9.3 km) और महासागरों के ऊपर इससे कहीं अधिक। इन नियमों को लागू करने के लिए नियंत्रक को अपने सेक्टर के हर विमान की स्थिति लगातार और भरोसेमंद ढंग से जाननी होती है: यह नहीं कि वह एक मिनट पहले कहाँ था, बल्कि यह कि वह अभी कहाँ है, कितना ऊँचा है और किस दिशा में जा रहा है। यह ज्ञान कैसे प्राप्त होता है, यही इस पूरे कोर्स का विषय है। इसके लिए तकनीकी शब्द है **निगरानी** (surveillance)।

### एक संख्या जो याद रखनी चाहिए

900 km/h पर विमान एक मिनट में 15 km और एक सेकंड में 250 m चलता है। निगरानी का कोई भी तरीका जो धीरे-धीरे, या बड़ी त्रुटि के साथ, अद्यतन होता है, नियंत्रक को ठीक उन्हीं दूरियों पर अनुमान लगाने के लिए छोड़ देता है जो सबसे ज़्यादा मायने रखती हैं।

## अध्याय 2

### ADS-B से पहले: रडार से विमान खोजना

पहला उत्तर, जो 1930 के दशक के अंत में विकसित हुआ और द्वितीय विश्व युद्ध के दौरान परिपक्व हुआ, था **प्राथमिक रडार** (primary radar)। एक बड़ा घूमता हुआ एंटीना रेडियो ऊर्जा का एक छोटा, बहुत शक्तिशाली स्पंद (pulse) भेजता है। जब यह स्पंद किसी विमान से टकराता है, तो उसका एक नन्हा-सा अंश वापस परावर्तित होता है। रडार स्पंद के निकलने और प्रतिध्वनि के लौटने के बीच का समय मापता है; चूँकि रेडियो प्रकाश की गति, 3,00,000 km/s, से चलता है, समय से दूरी मिल जाती है। एंटीना जिस ओर मुड़ा था, उससे दिशा मिल जाती है। प्राथमिक रडार अद्भुत रूप से स्वतंत्र है: विमान को किसी भी उपकरण की ज़रूरत नहीं, और इसीलिए सेना आज भी इसका उपयोग करती है। पर इसकी वास्तविक कमज़ोरियाँ हैं। दूर के विमान से लौटी प्रतिध्वनि असाधारण रूप से क्षीण होती है, इसलिए प्रेषक (transmitter) विशाल होना चाहिए। प्रतिध्वनि यह कुछ नहीं बताती कि विमान कौन है या कितना ऊँचा है। और एंटीना को एक चक्कर पूरा करने में कई सेकंड लगते हैं, इसलिए हर विमान केवल हर 4 से 12 सेकंड में एक बार दिखता है, और इस बीच वह 3 km तक आगे बढ़ चुका होता है।

दूसरे उत्तर, **द्वितीयक निगरानी रडार** (secondary surveillance radar, SSR), ने विमान को एक भागीदार बना दिया। एक भू-केंद्र 1030 MHz पर एक प्रश्न, एक *पूछताछ* (interrogation), प्रसारित करता है। विमान पर लगा एक छोटा रेडियो, **ट्रांसपोंडर** (transponder), यह प्रश्न सुनता है और 1090 MHz पर अपने ही एक सशक्त संकेत से उत्तर देता है। चूँकि उत्तर परावर्तित नहीं बल्कि प्रेषित होता है, यह रडार की प्रतिध्वनि से लाखों गुना अधिक सशक्त होता है, और चूँकि इसे एक कंप्यूटर बनाता है, यह सूचना ले जा सकता है। सबसे पुराने रूप (Mode A) में उत्तर में नियंत्रक द्वारा दिया गया चार अंकों का पहचान कोड होता है; Mode C में उसमें विमान की ऊँचाई भी होती है। 1980 के दशक में आया **Mode S** ("S" का अर्थ selective, चयनात्मक), जिसमें हर ट्रांसपोंडर का एक अद्वितीय 24-बिट पता होता है, उससे अलग से पूछताछ की जा सकती है, और वह 56 या 112 बिट के डेटा संदेशों से उत्तर दे सकता है। यह संख्या, 1090 MHz, और यह शब्द, Mode S, याद रखिए: ADS-B सीधे इन्हीं दोनों पर बना है।

द्वितीयक रडार एक बड़ा सुधार था, पर अपने पूर्ववर्ती की दो सीमाएँ अब भी उसमें थीं। विमान तभी बोलता है जब उससे पूछा जाए, इसलिए ज़मीन पर अब भी सीमा के भीतर एक पूछताछ करने वाला केंद्र चाहिए, जिससे महासागर, रेगिस्तान और पर्वत-श्रृंखलाएँ बाहर हो जाती हैं। और केंद्र को यह जानने के लिए अब भी घूमता एंटीना चाहिए कि उत्तर किस दिशा से आया, इसलिए हर विमान अब भी हर चक्कर में केवल एक बार दिखता है, और नियंत्रक के स्क्रीन पर अब भी एक ऐसा बिंदु दिखता है जो हर कुछ सेकंड में उछलता है, न कि सहज रूप से चलता हुआ विमान। इससे आगे बढ़ने के लिए कुछ मूलतः अलग चाहिए था: एक ऐसा तरीका जिससे विमान बिना पूछे अपनी स्थिति बताए, और ज़मीन को कुछ भी मापना न पड़े।

## अध्याय 3

### मूल विचार: विमान को खुद बताने दो

1990 के दशक तक दो तकनीकें परिपक्व हो चुकी थीं, जिन्होंने एक अलग रास्ता संभव बनाया। उपग्रह नौवहन (satellite navigation) ने हर उपयुक्त उपकरण वाले विमान को अपनी स्थिति का सटीक ज्ञान दिया, ज़मीन से किसी भी रडार के माप से कहीं बेहतर। और Mode S ट्रांसपोंडर पहले से ही एक ऐसा रेडियो दे रहा था जो 1090 MHz पर डेटा संदेश भेज सकता था।

दोनों को मिला दीजिए और तर्क अटल हो जाता है: ज़मीन विमान की स्थिति मापने के लिए जूझें, इसके बजाय विमान, जो पहले से ही जानता है, बस नियमित अंतराल पर सबको यह बता दे। यही ADS-B है, और इसके नाम के चार शब्द इसका सटीक वर्णन हैं।

यह **स्वचालित** (automatic) है: कोई चीज़ प्रसारण को शुरू नहीं करती। ट्रांसपोंडर अपने ही समय-क्रम पर, लगभग सेकंड में दो बार, भेजता है, चाहे कोई भू-केंद्र सीमा में हो या न हो और चाहे पायलट कुछ करे या न करे; वास्तव में पायलट उड़ान में इसे ट्रांसपोंडर बंद किए बिना रोक ही नहीं सकता, और ऐसा करना वर्जित है। यह **निर्भर** (dependent) है: संदेश की हर चीज़ विमान के अपने उपकरणों से आती है, स्थिति उसके उपग्रह रिसीवर से और ऊँचाई उसके दाब-आधारित ऊँचाई-मापी (pressure altimeter) से, और ज़मीन कुछ नहीं मापती; उसे जो बताया जाता है उस पर वह भरोसा करती है। यह **निगरानी** (surveillance) है: इसका उद्देश्य दूसरों को, हवाई यातायात नियंत्रण और आस-पास के विमानों को, यह बताना है कि विमान कहाँ है, जो नौवहन से अलग है, जिसमें विमान खुद जानता है कि वह कहाँ है, और संचार से भी अलग है, जो पायलट से बात करना है। और यह एक **प्रसारण** (broadcast) है: संदेश का कोई प्राप्तकर्ता नहीं, कोई पावती नहीं और कोई गोपनीय नहीं, और सीमा के भीतर रिसीवर रखने वाला हर कोई ठीक वही सुनता है, चाहे वह नियंत्रण केंद्र हो, कोई दूसरा यात्री विमान, या कोई स्कूल।

"निर्भर" वह शब्द है जो इंजीनियरों को चिंतित करता है और जिसे समझाना सबसे अधिक सार्थक है। रडार एक स्वतंत्र माप करता है: यदि विमान के उपकरण गलत हैं, तो रडार को इसकी परवाह नहीं। ADS-B विमान की अपनी नौवहन प्रणाली की हर त्रुटि विरासत में पाता है, और यदि वह प्रणाली धोखा खा जाए या विफल हो जाए, तो प्रसारित स्थिति उसी आत्मविश्वास के साथ गलत होती है। इसीलिए हर ADS-B संदेश स्थिति के साथ-साथ यह भी बताता है कि विमान अपनी स्थिति पर कितना भरोसा करता है (अखंडता और सटीकता की श्रेणियाँ, जिनसे हम अध्याय 5 में मिलेंगे), और इसीलिए रडार को बंद नहीं किया गया है।

"प्रसारण" वह शब्द है जो इस कोर्स को संभव बनाता है। चूँकि संदेश सबको खुले रूप में भेजे जाते हैं, उन्हें केवल हवाई यातायात नियंत्रण ही नहीं, बल्कि 1090 MHz पर ट्यून किया हर रिसीवर सुनता है, जिसमें वह भी शामिल है जो आप किसी स्कूल की छत पर रख सकते हैं। यही गुण प्रणाली की मुख्य सीमा का स्रोत भी है, जिसकी चर्चा अध्याय 11 में है: जो संदेश कोई भी पढ़ सकता है, उसे कोई भी गढ़ भी सकता है।

#### अध्याय 4

## विमान कैसे जानता है कि वह कहाँ है

ADS-B की हर चीज़ इस पर टिकी है कि विमान अपनी स्थिति जानता है, इसलिए यह अध्याय उपग्रह नौवहन के बारे में है। इसका सामान्य नाम है **GNSS**, Global Navigation Satellite System (वैश्विक नौवहन उपग्रह प्रणाली); अमेरिकी GPS सबसे प्रसिद्ध है, और यूरोप का Galileo, रूस का GLONASS और चीन का BeiDou उसी सिद्धांत पर काम करते हैं। हर प्रणाली लगभग 24 से 30 उपग्रहों का एक समूह है जो लगभग 20,000 km की ऊँचाई पर, विमान से बहुत ऊपर, परिक्रमा करते हैं, और हर उपग्रह पर एक परमाणु घड़ी है जो सेकंड के कुछ अरबवें हिस्से तक सटीक है। हर उपग्रह लगातार एक रेडियो संकेत भेजता है जो वास्तव में कहता है, "मैं उपग्रह संख्या N हूँ, मेरी स्थिति यह है, और जिस समय मैंने यह भेजा वह ठीक T है"।

विमान का रिसीवर इस संकेत को थोड़ी देर बाद सुनता है, क्योंकि रेडियो को यात्रा करने में समय लगता है: 3,00,000 km/s पर उपग्रह से 20,000 km की दूरी तय करने में सेकंड के लगभग 67 हज़ारवें हिस्से लगते हैं। रिसीवर संदेश में अंकित समय की तुलना आगमन के समय से करता है। यह अंतर, प्रकाश की गति से गुणा करने पर, उस उपग्रह की दूरी है। एक दूरी रिसीवर को

उस उपग्रह के चारों ओर एक गोले (sphere) पर कहीं रखती है। दो गोले एक वृत्त में मिलते हैं; तीन गोले दो बिंदुओं में, जिनमें से एक प्रायः बेतुका होता है (ज़मीन के बहुत नीचे या अंतरिक्ष में बहुत दूर) और उसे छोड़ दिया जाता है। तो तीन उपग्रह पर्याप्त होते, यदि रिसीवर के पास एक पूर्ण घड़ी होती।

पर ऐसा नहीं है। परमाणु घड़ी की कीमत हज़ारों यूरो होती है और वह समाएगी भी नहीं; रिसीवर में एक सस्ती क्वाटर्ज़ घड़ी होती है, जो आवश्यक समय-परिशुद्धता से कहीं अधिक गलत हो सकती है। यहीं आता है सुंदर हिस्सा। रिसीवर अपनी घड़ी की त्रुटि को अपने तीन स्थिति-निर्देशांकों के साथ चौथे अज्ञात की तरह लेता है, और चौथे उपग्रह को सुनता है। चार समीकरण, चार अज्ञात: रिसीवर अपनी स्थिति हल कर लेता है और, उप-उत्पाद के रूप में, अपनी घड़ी को कुछ दसियों नैनोसेकंड तक सही कर लेता है। इसीलिए उपग्रह रिसीवर को कम से कम चार उपग्रह दिखने चाहिए, और इसीलिए हर GNSS रिसीवर, संयोगवश, इमारत की सबसे सटीक घड़ियों में से एक भी होता है।

परिमाणों पर ठहरना सार्थक है, क्योंकि वे समझाते हैं कि उपग्रह नौवहन वास्तव में समय-मापन का अभ्यास है, जिसमें ज्यामिति बाद की बात है। प्रकाश एक नैनोसेकंड में 30 सेंटीमीटर और एक माइक्रोसेकंड में 300 मीटर चलता है, इसलिए सेकंड के दस लाखवें हिस्से की समय-त्रुटि 300 मीटर की स्थिति-त्रुटि बन जाती है, और आधुनिक रिसीवर की कुछ मीटर की सटीकता लगभग दस नैनोसेकंड के स्तर के समय-मापन के बराबर है। एक ठोस उदाहरण लीजिए। एक उपग्रह संकेत पर समय 12:00:00.000 000 000 अंकित करता है; विमान का रिसीवर उसे 12:00:00.070 000 000 पर सुनता है। यात्रा का समय 0.070 s है, इसलिए दूरी है  $0.070 \times 300\,000 \text{ km/s} = 21\,000 \text{ km}$ । यदि रिसीवर की अपनी घड़ी केवल एक माइक्रोसेकंड आगे होती, तो वह 21 000.3 km निकालता, 300 मीटर अधिक, और यही त्रुटि हर दूसरे उपग्रह की दूरी में भी घुस जाती। यही साझा त्रुटि है जिसे चौथा उपग्रह उजागर करता और हटाता है।

## दो ऊँचाइयाँ, एक नहीं

उपग्रह पृथ्वी की गणितीय सतह से ऊपर की ऊँचाई देते हैं, एक *ज्यामितीय ऊँचाई*। फिर भी विमान हवाई यातायात के लिए जो ऊँचाई प्रसारित करता है, वह यह नहीं है। वह है **वायुदाब-आधारित ऊँचाई** (barometric altitude), जो विमान के बाहर की हवा के दाब से निकाली जाती है, जिसे धड़ (fuselage) में एक छोटे छिद्र, स्टैटिक पोर्ट, से मापा जाता है। हवा का दाब ऊँचाई के साथ एक ज्ञात ढंग से घटता है (ज़मीन के पास लगभग 1 hPa प्रति 8 मीटर, और ऊपर जाकर धीमे), और दुनिया का हर ऊँचाई-मापी दाब को ऊँचाई में बदलने के लिए एक ही मानक वायुमंडल का उपयोग करता है, जिसका संदर्भ समुद्र तल पर 1013.25 hPa है। असामान्य दाब वाले दिन हर विमान की वायुदाब-आधारित ऊँचाई एक ही मात्रा से गलत होती है, और ठीक यही बात है: पृथक्करण के लिए समुद्र से वास्तविक ऊँचाई नहीं, बल्कि यह मायने रखता है कि "फ़्लाइट लेवल 350" पढ़ने वाले दो विमान "फ़्लाइट लेवल 340" पढ़ने वाले से सचमुच 300 मीटर दूर हैं। ADS-B अपने स्थिति-संदेशों में वायुदाब-आधारित ऊँचाई 25 फ़ीट (7.6 m) के चरणों में प्रसारित करता है, और अलग से इसके और उपग्रह से मिली ऊँचाई के बीच का अंतर भी, ताकि रिसीवर दोनों को निकाल सके।

## अध्याय 5

### एक संदेश की संरचना

दुनिया भर के यात्री विमानों द्वारा उपयोग किया जाने वाला ADS-B संदेश एक Mode S प्रसारण है जिसे **एक्सटेंडेड स्क्विटर** (extended squitter) कहते हैं; "स्क्विटर" रडार की पुरानी बोलचाल में उस प्रसारण को कहते हैं जो उत्तर में नहीं बल्कि स्वतः भेजा जाता है, और "एक्सटेंडेड" इसलिए कि 112 बिट पर यह मूल Mode S उत्तर से दोगुना लंबा है। इंजीनियर "1090 MHz extended squitter" के लिए "1090ES" लिखते हैं। हर प्रसारण कुल 120 माइक्रोसेकंड चलता है: 8 माइक्रोसेकंड की एक *प्रस्तावना* (preamble), चार स्पंदों का एक निश्चित पैटर्न जिससे रिसीवर संदेश की शुरुआत पहचानता है और अपनी घड़ी मिलाता है, और उसके बाद 112 डेटा बिट, एक बिट प्रति माइक्रोसेकंड।

## एक बिट कैसे भेजा जाता है: पल्स पोज़िशन मॉड्युलेशन

एक माइक्रोसेकंड के हर बिट-खाने को दो हिस्सों में बाँटा जाता है। पहले हिस्से में रेडियो ऊर्जा का एक स्पंद और दूसरे में मौन का अर्थ है 1; पहले मौन और फिर स्पंद का अर्थ है 0। इस तरह डेटा चाहे जो हो, हर बिट में ठीक एक स्पंद होता है, और रिसीवर को केवल यह तय करना होता है कि हर खाने का कौन-सा आधा हिस्सा ज़्यादा तेज़ था। यह योजना, पल्स पोज़िशन मॉड्युलेशन (pulse position modulation), उस तरह के शोर और क्षीणन के विरुद्ध मज़बूत है जो संकेत ट्रांसपोंडर से दूर के एंटीना तक जाते हुए झेलता है, और इसे डिकोड करना सस्ता है।

### 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

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

पहले पाँच बिट, डाउनलैंक फ़ॉर्मेट, बताते हैं कि यह किस तरह का Mode S संदेश है; मान 17 का अर्थ है "Mode S ट्रांसपोंडर से ADS-B"। 24-बिट का **ICAO पता** विमान की स्थायी पहचान है, जो उसके पंजीकरण के समय दिया जाता है: 2 की घात 24, यानी 1,67,77,216, संभव पते हैं, जिन्हें ICAO, संयुक्त राष्ट्र की नागर विमानन संस्था, खंडों में देशों को आवंटित करती है। उदाहरण के लिए बेल्जियम के विमान हेक्साडेसिमल में 448000 से 44FFFF तक के पते रखते हैं। पुराने Mode A के चार अंकों के कोड के विपरीत, यह पता कभी नहीं बदलता और कभी साझा नहीं होता, इसलिए रिसीवर पहले ही संदेश से निश्चित हो सकता है कि वह किस विमान को सुन रहा है।

56-बिट का **ME** फ़ील्ड वास्तविक सामग्री है, और इसके पहले पाँच बिट, *टाइप कोड*, बताते हैं कि बाकी का अर्थ क्या है। टाइप कोड 1 से 4 विमान का कॉल साइन ले जाते हैं, जैसे BEL1234 या RYR7KL, छह-छह बिट के आठ अक्षरों के रूप में। कोड 9 से 18 हवा में स्थिति और वायुदाब-आधारित ऊँचाई ले जाते हैं; 20 से 22 वही, उपग्रह से मिली ऊँचाई के साथ। कोड 19 वेग ले जाता है: भू-गति (ground speed) पूर्व-पश्चिम और उत्तर-दक्षिण घटकों में बँटी हुई, ऊर्ध्वाधर दर, और वायुदाब-आधारित और उपग्रह ऊँचाई के बीच का अंतर। कोड 28, 29 और 31 स्थिति-सूचना ले जाते हैं: आपातकालीन कोड, चुनी हुई ऊँचाई, और अखंडता और सटीकता की वे श्रेणियाँ जो बताती हैं कि प्रसारित स्थिति पर कितना भरोसा किया जा सकता है (उदाहरण के लिए "NIC" 8 का वादा है कि वास्तविक स्थिति बताई गई स्थिति से 185 m के भीतर है, उच्च प्रायिकता के साथ)।

अंतिम 24 बिट एक **चक्रीय अतिरिक्त जाँच** (cyclic redundancy check, CRC) हैं, एक संख्या जो पिछले 88 बिट से एक निश्चित बहुपद विभाजन (polynomial division) द्वारा निकाली जाती है। रिसीवर अपने डिकोड किए बिट पर यही गणना दोहराता है; यदि परिणाम नहीं मिलता, तो रास्ते में कम से कम एक बिट बिगड़ा है और संदेश छोड़ दिया जाता है। चूँकि एक माइक्रोसेकंड का स्पंद शोर में या किसी दूसरे विमान के ऊपर चढ़ते संदेश में आसानी से खो सकता है, यही जाँच बिगड़ी हुई स्थितियों को नियंत्रक के स्क्रीन से दूर रखती है। एक वास्तविक संदेश, जैसा रिसीवर उसे दर्ज करेगा, ऐसा दिखता है:

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: डाउनलिक फ़ॉर्मेट 17, क्षमता 5। 4840D6: ICAO पता, एक डच विमान। 20...: टाइप कोड 4, एक पहचान संदेश, जो कॉल साइन KLM1023 में डिकोड होता है। 576098: त्रुटि-जाँच।

## पृथ्वी को 34 बिट में समाना

एक स्थिति-संदेश में अक्षांश के लिए केवल 17 बिट और देशांतर के लिए 17 बिट हैं। यानी पूरे भूमंडल के चारों ओर 1,31,072 चरण, भूमध्य रेखा पर लगभग 300 m प्रत्येक: यह बिल्कुल पर्याप्त नहीं है। ADS-B इसे **कॉम्पैक्ट पोज़िशन रिपोर्टिंग** (compact position reporting, CPR) से हल करता है। पृथ्वी को क्षेत्रों (zones) में बाँटा जाता है; 17 बिट एक क्षेत्र के भीतर बहुत सटीक स्थिति (लगभग 5 m तक) देते हैं, पर यह नहीं कि कौन-सा क्षेत्र। विमान दो थोड़े अलग क्षेत्र-ग्रिड, "सम" (even) और "विषम" (odd) संदेशों, के बीच बारी-बारी से बदलता रहता है, और जिस रिसीवर ने दोनों में से एक-एक सुन लिया हो, वह क्षेत्र को बिना किसी संदेह के निकाल सकता है। एक बार यह हो जाए, तो विमान का पीछा करने के लिए एक ही संदेश काफी है, क्योंकि वह आधे सेकंड में किसी दूसरे क्षेत्र में कूद ही नहीं सकता। यह एक चतुर तरकीब है जो बिट की कोई कीमत चुकाए बिना उपयोगी परिशुद्धता दोगुनी कर देती है।

## कितनी बार

उड़ान में ट्रांसपोंडर सेकंड में दो बार एक स्थिति-संदेश, सेकंड में दो बार एक वेग-संदेश, और हर पाँच सेकंड में अपना कॉल साइन भेजता है, और लंबे अंतराल पर स्थिति-सूचना संदेश भी, यानी कुल मिलाकर प्रति सेकंड लगभग चार से पाँच एक्सटेंडेड स्क्विटर। हर एक 120 माइक्रोसेकंड चलता है; ट्रांसपोंडर वास्तव में समय के हजारों हिस्से से भी बहुत कम समय ADS-B प्रसारित करता है। बाकी सेकंड वह 1030 MHz पर रडार की पूछताछ और दूसरे विमानों के टक्कर-निवारण प्रश्नों को सुनता और उनका उत्तर देता है।

## अध्याय 6 - भौतिकी

### तरंग: अदृश्य प्रकाश के रूप में रेडियो

संदेश विमान से एक **रेडियो तरंग** के रूप में निकलता है, और इस कोर्स का सबसे उपयोगी एकमात्र विचार यह है कि रेडियो तरंग और प्रकाश की किरण एक ही चीज़ हैं। दोनों विद्युत-चुंबकीय तरंगें हैं: विद्युत और चुंबकीय क्षेत्रों का एक पैटर्न जो साथ-साथ दोलन करता है और अंतरिक्ष में प्रकाश की गति,  $c$ , से चलता है, जो 29,97,92,458 मीटर प्रति सेकंड है, यानी लगभग 3,00,000 km/s। रेडियो तरंग को हरे प्रकाश से, अस्पताल की X-किरणों से या रसोई के ओवन की माइक्रोवेव से जो चीज़ अलग करती है, वह केवल यह है कि क्षेत्र कितनी तेज़ी से दोलन करते हैं: **आवृत्ति** (frequency),  $f$ , जो हर्ट्ज़ (दोलन प्रति सेकंड) में मापी जाती है।

चूँकि तरंग एक निश्चित गति से चलती है, आवृत्ति एक शिखर और अगले शिखर के बीच की दूरी, **तरंगदैर्घ्य** (wavelength),  $\lambda$ , तय कर देती है। एक सेकंड में तरंग  $c$  मीटर चलती है और  $f$  दोलन पूरे करती है, इसलिए हर दोलन  $c / f$  मीटर घेरता है:

$$c = f \times \lambda$$

ADS-B के लिए:  $\lambda = 300\,000\,000 / 1\,090\,000\,000 = 0.275\text{ m}$ । विमान और आपके एंटीना के बीच की तरंग के शिखर 27.5 cm की दूरी पर हैं, लगभग स्कूल के एक स्केल की लंबाई।

| तरंग                  | आवृत्ति          | तरंगदैर्घ्य | टिप्पणी                                     |
|-----------------------|------------------|-------------|---------------------------------------------|
| FM प्रसारण रेडियो     | 100 MHz          | 3 m         | कार के एंटीना इसका एक अंश हैं               |
| ADS-B / Mode S        | 1090 MHz         | 27.5 cm     | रडार ट्रांसपोंडर के उत्तरों में भी प्रयुक्त |
| मोबाइल फ़ोन (4G बैंड) | 1800 MHz         | 17 cm       | स्पेक्ट्रम में एक नज़दीकी पड़ोसी            |
| Wi-Fi, माइक्रोवेव ओवन | 2450 MHz         | 12 cm       | वही आवृत्ति, बिल्कुल अलग शक्ति              |
| दृश्य हरा प्रकाश      | 56,00,00,000 MHz | 0.000 54 mm | आवृत्ति में पाँच लाख गुना अधिक              |

आगे की हर बात के लिए दो परिणाम मायने रखते हैं। पहला, चूँकि तरंग प्रकाश है, वह सीधी रेखा में चलती है जब तक कोई चीज़ उसे मोड़े या रोके नहीं, और वह पृथ्वी के आर-पार नहीं जाती। यही प्रणाली की सीमा (range) तय करता है, जो अध्याय 7 का विषय है। दूसरा, चूँकि इसका तरंगदैर्घ्य 27.5 cm है, जो धातु की संरचनाएँ इसके साथ सबसे प्रबल रूप से अंतःक्रिया करती हैं, यानी एंटीना, उसी क्रम के आकार की होती हैं, जो अध्याय 8 का विषय है।

## रेडियो ध्वनि क्यों नहीं है

सबसे आम भ्रम, बच्चों में जितना उतना ही वयस्कों में, रेडियो और ध्वनि के बीच है, शायद इसलिए कि "रेडियो" एक ऐसा डिब्बा है जो आवाज़ निकालता है। ये दो असंबंधित परिघटनाएँ हैं। ध्वनि हवा में दाब की एक तरंग है, अणुओं की एक श्रृंखला जो अपने पड़ोसियों को धकेलती है; उसे चलने के लिए एक माध्यम चाहिए, वह 340 m/s की गति से चलती है, और वह निर्वात को पार नहीं कर सकती। रेडियो को कुछ नहीं चाहिए: वह उपग्रह और विमान के बीच के निर्वात को पार करता है, और लगभग दस लाख गुना तेज़ चलता है। विमान के इंजन का शोर और उसका ADS-B संदेश एक ही क्षण उससे निकलते हैं; संदेश 20 km दूर के रिसीवर तक 67 माइक्रोसेकंड में पहुँचता है, ध्वनि पूरे एक मिनट बाद।

## 1090 MHz ही क्यों

यह आवृत्ति एक विरासत है। 1950 के दशक के अंतरराष्ट्रीय समझौतों ने 960 से 1215 MHz का बैंड वैमानिक रेडियो-नौवहन के लिए आरक्षित किया, और 1090 MHz द्वितीयक रडार ट्रांसपोंडरों की उत्तर-आवृत्ति बन गई। जब ADS-B की रचना हुई, तो हर यात्री विमान में पहले से लगे ट्रांसपोंडर का पुनः उपयोग करना नया रेडियो लगाने से कहीं सस्ता था, इसलिए ADS-B बस एक और चीज़ बन गया जो Mode S ट्रांसपोंडर 1090 MHz पर कहता है। संयुक्त राज्य अमेरिका में लगभग 5,500 m से नीचे उड़ने वाले छोटे विमान इसके बजाय एक दूसरी प्रणाली, 978 MHz पर UAT, का उपयोग कर सकते हैं, और इसीलिए वहाँ के रिसीवर प्रायः दोनों पर सुनते हैं।

### अध्याय 7 - भौतिकी

## सीमा: पृथ्वी की गोलाई और संकेत का क्षीण होना

ट्रांसपोंडर कुछ सौ वाट की शिखर शक्ति से प्रसारण करता है। ऐसा संकेत कितनी दूर से सुना जा सकता है? दो बिल्कुल अलग चीज़ें इसे सीमित करती हैं, और उन्हें अलग रखना सार्थक है: ज्यामिति, जो एक कठोर किनारा तय करती है, और शक्ति, जो एक नरम किनारा तय करती है।

## रेडियो क्षितिज

1090 MHz पर रेडियो प्रकाश की तरह व्यवहार करता है: वह सीधी रेखा में चलता है और पृथ्वी के चारों ओर नहीं मुड़ता। इसलिए ज़मीन पर रखा एंटीना किसी विमान को तभी तक सुन सकता है जब तक उनके बीच एक सीधी रेखा हो जो ज़मीन से होकर न गुजरे। सतह पर खड़े प्रेक्षक के लिए क्षितिज वहाँ है जहाँ वह रेखा पृथ्वी को बस छूकर निकलती है। विमान जितना ऊँचा, वह स्पर्श-बिंदु उतना दूर; एंटीना जितना ऊँचा, उतना और दूर। गोले की स्पर्श-रेखा (tangent) की ज्यामिति एक सरल परिणाम देती है: किलोमीटर में क्षितिज की दूरी मीटर में ऊँचाई के वर्गमूल का लगभग 3.57 गुना है। वायुमंडल रेडियो को थोड़ा नीचे की ओर मोड़ता है, जिससे क्षितिज लगभग 15 प्रतिशत खिंच जाता है, इसलिए इंजीनियर 3.57 की जगह 4.12 का उपयोग करते हैं:

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h_{\text{antenna}}} + \sqrt{h_{\text{aircraft}}})$$

विमान 11 000 m पर, एंटीना 20 m ऊँची छत पर:  $4.12 \times (104.9 + 4.5) = 451 \text{ km}$ । विमान 1 000 m पर, वही छत:  $4.12 \times (31.6 + 4.5) = 149 \text{ km}$ । 15 km दूर ज़मीन पर खड़ा विमान: बिल्कुल नहीं सुनाई देता, जब तक बीच की ज़मीन समतल और खुली न हो।



यही रिसीवर के कवरेज के विशिष्ट आकार को समझाता है: ऊँचे उड़ते यातायात के लिए 400 km या उससे बड़ा वृत्त, जो उतरते विमानों के लिए सिकुड़कर कुछ दसियों किलोमीटर रह जाता है, और ज़मीन पर खड़े विमानों के लिए लगभग कुछ नहीं, सिवाय बगल के हवाई अड्डे के। यह यह भी समझाता है कि रिसीवर की ऊँचाई रिसीवर की गुणवत्ता से कहीं अधिक क्यों मायने रखती है, और क्यों एक पहाड़ी, एक ऊँची इमारत या यहाँ तक कि विमान का अपना पंख, जब वह आपसे दूर की ओर झुकता है, संकेत को तुरंत काट सकता है।

## व्युत्क्रम वर्ग नियम

क्षितिज के भीतर संकेत दूरी के साथ कमज़ोर होता है। ट्रांसपोंडर का एंटीना सभी क्षैतिज दिशाओं में विकिरण करता है, इसलिए उसकी शक्ति एक निरंतर बड़े होते गोले पर फैलती जाती है। गोले का क्षेत्रफल उसकी त्रिज्या के वर्ग के साथ बढ़ता है, इसलिए एक निश्चित आकार के एंटीना पर पड़ने वाली शक्ति दूरी के वर्ग के साथ घटती है: दुगुनी दूरी, चौथाई शक्ति; दस गुनी दूरी, सौवाँ हिस्सा। इंजीनियर इसे डेसिबल में *पथ क्षय* (path loss) के रूप में व्यक्त करते हैं, और 1090 MHz पर 400 km के लिए यह लगभग 145 dB आता है, यानी प्राप्त शक्ति प्रेषित शक्ति से लगभग 10 की घात 14.5 गुना छोटी है। 250 वाट का स्पंद लगभग एक मिलीवाट के दस अरबवें हिस्से के रूप में पहुँचता है। एक अच्छा रिसीवर इसे, बस किसी तरह, पकड़ सकता है, और इसीलिए ज्यामितीय क्षितिज और शक्ति की सीमा संयोग से कुछ सौ किलोमीटर पर एक साथ पड़ती हैं: प्रणाली की रचना ऐसी ही की गई थी।

ये दोनों सीमाएँ एक ऐसे ढंग से परस्पर क्रिया करती हैं जिसे समझना सार्थक है। क्षितिज के भीतर, पास के विमान का सशक्त संकेत और दूर के विमान का क्षीण संकेत दोनों पूरी तरह डिकोड होते हैं, क्योंकि अध्याय 5 की पल्स पोज़िशन योजना केवल यह पूछती है कि हर बिट-खाने का कौन-सा आधा हिस्सा ज़्यादा तेज़ था, न कि कितना तेज़। विमान के दूर जाने पर संकेत धीरे-धीरे अनुपयोगी नहीं होता जाता; वह तब तक डिकोड होने योग्य रहता है जब तक, क्षितिज के पास कहीं, या तो ज्यामिति उसे काट न दे या रिसीवर का शोर अंततः उसे डुबो न दे, और ट्रैक रुक जाता है। इसीलिए कवरेज मैप के किनारे तीखे होते हैं, और इसीलिए रिसीवर जिन सबसे दूर के विमानों को सुनता है, वे लगभग हमेशा सबसे ऊँचे होते हैं।

## अध्याय 8 - भौतिकी

### एंटीना: 27 सेंटीमीटर की तरंग को पकड़ना

एंटीना चालक (conductor) का एक टुकड़ा है जिसे ऐसा आकार दिया गया है कि पास से गुज़रती विद्युत-चुंबकीय तरंग उसके इलेक्ट्रॉनों को ताल में गतिमान कर दे, जिससे एक नन्ही प्रत्यावर्ती धारा (alternating current) बनती है जिसे रिसीवर प्रवर्धित कर सकता है। प्रेषक में इसका उल्टा होता है: विमान के एंटीना में बहती प्रत्यावर्ती धारा तरंग को छोड़ती है। इस आदान-प्रदान की दक्षता तरंगदैर्घ्य के सापेक्ष चालक के आकार पर निर्भर करती है। एक सीधा तार सबसे प्रबल प्रतिक्रिया देता है, वह *अनुनाद* (resonance) करता है, जब वह आधे तरंगदैर्घ्य जितना लंबा हो, ताकि उसमें आगे-पीछे दौड़ती धारा तरंग के दोलन में ठीक-ठीक बैठ जाए, जैसे बच्चे का झूला उसकी स्वाभाविक लय पर धकेला जाए। 1090 MHz के लिए आधा तरंगदैर्घ्य 13.75 cm है।

सबसे आम व्यावहारिक रूप है **चौथाई-तरंग मोनोपोल** (quarter-wave monopole): तरंगदैर्घ्य के एक चौथाई, 6.9 cm, लंबी एक ऊर्ध्वाधर छड़, जो एक चालक सतह, *ग्राउंड प्लेन*, पर खड़ी है। ग्राउंड प्लेन दर्पण की तरह काम करता है, इसलिए छड़ और उसका प्रतिबिंब मिलकर आधी-तरंग एंटीना की तरह व्यवहार करते हैं। इसीलिए विमान का ADS-B एंटीना धड़ पर कुछ सेंटीमीटर ऊँचा एक ठिगना ब्लेड है, जिसमें धड़ ही ग्राउंड प्लेन है, और इसीलिए शौकिया एंटीना एक टिन के ढक्कन पर लगा छोटा तार है। गलत लंबाई का तार भी काम करता है, पर कहीं कम अच्छा: "धातु का कान" ट्यून किया हुआ है।

एंटीना के तीन और गुण भौतिकी से निकलते हैं और हर एक का एक दृश्य परिणाम है। पहला है **ध्रुवीकरण** (polarisation)। विद्युत-चुंबकीय तरंग का विद्युत क्षेत्र उसकी गति की दिशा के समकोण पर एक निश्चित दिशा में दोलन करता है, और एंटीना केवल क्षेत्र के उस घटक पर प्रतिक्रिया देता है जो उसकी अपनी लंबाई के साथ हो। विमान के एंटीना ऊर्ध्वाधर लगाए जाते हैं, इसलिए ADS-B तरंग ऊर्ध्वाधर रूप से ध्रुवित होकर पहुँचती है, और प्राप्त करने वाला एंटीना भी ऊर्ध्वाधर होना चाहिए; करवट लिटा दिया जाए तो वह लगभग कुछ नहीं सुनता, जैसे ऊपर-नीचे हिलाई गई रस्सी की तरंग एक क्षैतिज झिरी से रुक जाती है। दूसरा है **विकिरण पैटर्न** (radiation pattern)। ऊर्ध्वाधर एंटीना क्षितिज की ओर सबसे अधिक संवेदनशील होता है और अपनी ही धुरी के साथ बिल्कुल नहीं, इसलिए तीन आयामों में उसकी संवेदनशीलता का आकार एक छल्लेदार डोनट जैसा है जिसके छेद से एंटीना गुज़रता है। इसलिए रिसीवर 300 km दूर के विमानों को नियमित रूप से बिना कठिनाई सुनते हैं और ठीक सिर के ऊपर से गुज़रते विमान को कुछ सेकंड के लिए खो देते हैं, एक ऐसी चीज़ जिसे किसी भी लाइव मैप पर देखने लायक है। कई अनुनादी अवयवों को एक के ऊपर एक जमाने से डोनट चपटा हो जाता है, जिससे संवेदनशीलता क्षितिज की ओर केंद्रित होती है, जहाँ दूर के विमान हैं, और सिर के ऊपर की कीमत पर; एंटीना के **लाभ** (gain) का यही अर्थ है, और यह हमेशा संवेदनशीलता का पुनर्वितरण है, उसका सृजन कभी नहीं।

तीसरा गुण एंटीना और रिसीवर के बीच बैठी चीज़ों से संबंधित है। एंटीना केवल 1090 MHz ही नहीं, आस-पास का हर संकेत पकड़ता है, जिनमें कुछ सौ मेगाहर्ट्ज़ दूर के मोबाइल फ़ोन के प्रसारण भी हैं जो कहीं अधिक सशक्त हैं, इसलिए सबसे पहले एक फ़िल्टर लगाया जाता है जो केवल विमानन बैंड को गुज़रने देता है। फिर संकेत को एक केबल से नीचे आना होता है, और 1090 MHz पर एक समाक्षीय (coaxial) केबल हर दस मीटर पर लगभग आधा संकेत खो देती है; इसका उपाय है एंटीना पर,

केबल से पहले, एक निम्न-शोर प्रवर्धक (low-noise amplifier), ताकि संकेत यात्रा को झेलने जितना सशक्त हो, न कि रिसीवर पर, जहाँ प्रवर्धन केबल के शोर को भी संकेत के बचे हुए हिस्से के साथ बढ़ा देता। ये विवरण हैं, पर यही वे विवरण हैं जो तय करते हैं कि स्कूल की छत पर रखा रिसीवर क्षितिज के विमानों को सुनता है या केवल पास वालों को।

## अध्याय 9

### ग्रहण और डिकोडिंग

एंटीना और मैप पर एक बिंदु के बीच पाँच चरणों की एक श्रृंखला है। एंटीना गुजरती तरंग को कुछ माइक्रोवोल्ट की प्रत्यावर्ती धारा में बदलता है। एक फ़िल्टर और एक निम्न-शोर प्रवर्धक 1090 MHz बैंड को रखते हैं, बाकी सब हटाते हैं, और संकेत को हजार गुना बढ़ाते हैं। एक सॉफ़्टवेयर-परिभाषित रेडियो (software-defined radio) आवृत्ति पर ट्यून होता है और संकेत के प्रति सेकंड बीस लाख नमूने लेता है, उसे संख्याओं की एक धारा में बदलते हुए। एक डिकोडर उस धारा में प्रस्तावना का पैटर्न खोजता है, 112 बिट पढ़ता है, समता (parity) जाँचता है और फ़्रील्ड डिकोड करता है। और एक ट्रैकर हर विमान के संदेशों को एक अकेले, लगातार अद्यतन होते रिकॉर्ड में इकट्ठा करता है: एक स्थिति, एक ट्रैक, एक लेबल।

उल्लेखनीय चरण तीसरा है। लगभग 2010 तक 1090 MHz को डिकोड करने के लिए हजारों यूरो के विशेष हार्डवेयर की ज़रूरत थी। फिर शौकीनों ने खोजा कि 20 यूरो के एक USB टेलीविज़न ट्यूनर में एक ऐसी चिप है जिसे किसी भी आवृत्ति पर ट्यून होने और कच्चा संकेत कंप्यूटर को सौंपने के लिए कहा जा सकता है। यह **सॉफ़्टवेयर-परिभाषित रेडियो** (SDR) रेडियो की समस्या को प्रोग्रामिंग की समस्या में बदल देता है: एक लैपटॉप या Raspberry Pi को संकेत की तीव्रता बताने वाली प्रति सेकंड बीस लाख संख्याओं की धारा मिलती है, और मुफ़्त सॉफ़्टवेयर प्रस्तावना का पैटर्न खोजता है, मापता है कि हर माइक्रोसेकंड के खाने का कौन-सा आधा हिस्सा ज़्यादा तेज़ है, 112 बिट जोड़ता है, CRC निकालता है, और फ़्रील्ड छापता है। माध्यमिक किट की रिसीवर परियोजना ठीक यही श्रृंखला है, और एक स्कूल इसे 100 यूरो से कम में बना सकता है।

ट्रैकर का चरण वह है जहाँ संदेशों की धारा ज्ञान बनती है। याद रखिए, एक अकेला स्थिति-संदेश तब तक अस्पष्ट रहता है जब तक एक सम और एक विषम संदेश की जोड़ी न बन जाए। वेग स्थिति से अलग आता है, कॉल साइन फिर अलग, और ट्रैकर इन्हें ICAO पते के आधार पर जोड़ता है, त्रुटि-जाँच में विफल हर चीज़ को छोड़ देता है, और हर विमान की अंतिम ज्ञात अवस्था रखता है। यदि एक मिनट तक कोई संदेश न आए, जो प्रायः इसलिए होता है कि विमान क्षितिज के नीचे चला गया है, तो ट्रैक समाप्त हो जाता है।

## अध्याय 10

### एक रिसीवर से एक महाद्वीप के मैप तक

एक रिसीवर कुछ सौ किलोमीटर चौड़े आसमान के एक वृत्त को सुनता है। यूरोप के मैप के लिए ऐसे सैकड़ों चाहिए, और उपयोगी रिसीवर शहरों में नहीं बल्कि फैले हुए होते हैं: तटों पर, घाटियों में, द्वीपों पर, जहाँ भी किसी दूसरे रिसीवर का वृत्त नहीं पहुँचता। हर रिसीवर अपने डिकोड किए संदेश, हर एक पर आगमन का समय अंकित करके, इंटरनेट के ज़रिए एक केंद्रीय सेवा को भेजता है। वह सेवा *एकत्रीकरण* करती है: ऊँचे विमान का एक ही संदेश आम तौर पर दस या बीस रिसीवरों से एक साथ आता है, और दोहरावों को पहचानकर मिलाना होता है। वह जाँच भी करती है: जो स्थिति उसी विमान के बारे में हर पड़ोसी रिसीवर के दृष्टिकोण से असहमत हो, वह शायद डिकोडिंग की त्रुटि या खराब ट्रांसपोंडर है, और उसे चिह्नित या छोड़ दिया जाता है।

## मल्टीलैटरेशन: उन विमानों को खोजना जो नहीं बताते कि वे कहाँ हैं

हर विमान स्थिति प्रसारित नहीं करता। पुराने ट्रांसपोंडर रडार को पहचान और ऊँचाई से उत्तर देते हैं पर उनमें उपग्रह का इनपुट नहीं होता; कुछ विमान जान-बूझकर कुछ नहीं भेजते। फिर भी उनके 1090 MHz प्रसारण ज़मीन तक पहुँचते हैं, और एक नेटवर्क उपग्रह नौवहन को उलटकर उन्हें खोज सकता है। यदि सटीक रूप से मिलाई हुई घड़ियों वाले चार रिसीवर, हर एक, उसी प्रसारण के पहुँचने का क्षण दर्ज करें, तो उन क्षणों के अंतर दूरियों के अंतर प्रकट करते हैं: जो संदेश रिसीवर B से एक माइक्रोसेकंड पहले रिसीवर A तक पहुँचा, वह ऐसे बिंदु से भेजा गया जो B की तुलना में A से 300 m अधिक पास है। इस गुण वाले सभी बिंदु A और B के बीच एक वक्र सतह, एक अतिपरवलयज (hyperboloid), पर स्थित हैं। चार रिसीवरों से ऐसी तीन सतहें विमान पर मिलती हैं। यही **मल्टीलैटरेशन** (multilateration) है, और इसके लिए सैकड़ों किलोमीटर दूर रखे रिसीवरों के बीच लगभग एक माइक्रोसेकंड के दसवें हिस्से, 30 m, तक का समय-मापन चाहिए, जो रिसीवर उन्हीं उपग्रहों से पाते हैं जिनका उपयोग विमान करता है।

### वही विचार, दो बार

उपग्रह नौवहन: एक रिसीवर, चार प्रेषक जिनकी स्थितियाँ ज्ञात हैं, रिसीवर के लिए हल करो। मल्टीलैटरेशन: एक प्रेषक, चार रिसीवर जिनकी स्थितियाँ ज्ञात हैं, प्रेषक के लिए हल करो। दोनों में वास्तव में जो मापा जाता है वह समय है, और 1 माइक्रोसेकंड 300 मीटर है।

## अध्याय 11

## इसका उपयोग किसलिए होता है, और यह कहाँ कम पड़ता है

हवाई यातायात नियंत्रण पहला ग्राहक है। पूरे यूरोप में नियंत्रक अब एक मिला-जुला चित्र देखते हैं जिसमें ADS-B, अपने सेकंड में दो बार के अद्यतन और उपग्रह-स्तर की सटीकता के साथ, रडार और मल्टीलैटरेशन से जोड़ा जाता है; जहाँ रडार कभी नहीं पहुँचा, उत्तरी अटलांटिक, आर्कटिक, सहारा और अधिकांश महासागरों के ऊपर, ADS-B संदेशों को निम्न-कक्षा के संचार उपग्रहों पर लगे रिसीवर पकड़ते हैं, जिससे अटलांटिक पार करते विमानों को पहले से कहीं पास-पास रखा जा सका है। विमान दूसरे ग्राहक हैं: "ADS-B In" वाला यात्री विमान अपने चालक दल को आस-पास का यातायात दिखाता है और उसे टक्कर-निवारण प्रणाली में भेजता है। हवाई अड्डे कोहरे में ज़मीन पर विमानों और वाहनों का पीछा करने के लिए इसका उपयोग करते हैं। शोधकर्ता खुले डेटा से शोर, ईंधन की खपत, कंट्रोल और देरी का अध्ययन करते हैं। और स्कूल की छत पर रखा रिसीवर, छोटे ढंग से ही सही, इन सबका भागीदार है।

प्रणाली की कमज़ोरियाँ सीधे उसकी रचना से निकलती हैं, और हर एक को केवल गिनाने के बजाय समझना सार्थक है। चूँकि संदेश खुले रूप में प्रसारित होते हैं, न गोपित न हस्ताक्षरित, संदेश में अपने-आप में ऐसा कुछ नहीं जो सिद्ध करे कि वह किसी विमान से आया है। ज़मीन पर रखा एक प्रेषक, अवैध रूप से, एक ऐसे विमान का वर्णन करता पूर्ण रूप से गठित संदेश प्रसारित कर सकता है जिसका अस्तित्व ही नहीं, और रिसीवर उसे बिना शिकायत डिकोड कर लेगा। प्रणाली की रक्षा संदेश नहीं बल्कि उसके चारों ओर का संदर्भ करता है: एक प्रेत रडार पर नहीं दिखेगा, मल्टीलैटरेशन से नहीं मिलेगा, और वास्तविक यातायात की तरह व्यवहार नहीं करेगा, और नियंत्रण केंद्र लगातार मिलान करते रहते हैं। क्रिप्टोग्राफ़िक हस्ताक्षरों वाले प्रोटोकॉल के एक संस्करण पर कई वर्षों से चर्चा चल रही है; बाधा तकनीकी से अधिक व्यावहारिक है, क्योंकि दुनिया के हर ट्रांसपोंडर को बदलना पड़ेगा।

चूँकि स्थिति विमान के उपग्रह रिसीवर पर निर्भर है, जो कुछ उपग्रह नौवहन को बाधित करता है वह ADS-B को भी बाधित करता है। उपग्रह संकेतों का जैमिंग और स्पूफ़िंग संघर्ष क्षेत्रों के पास आम हो गया है, और ऐसे इलाके से उड़ता विमान स्थिति निकालने में असमर्थ हो सकता है, या गलत स्थिति निकाल सकता है। तब उसके संदेश एक घटी हुई अखंडता श्रेणी ले जाते हैं,

नियंत्रक की प्रणाली उन्हें चिह्नित करती है, और रडार, वह स्वतंत्र माप जिसकी जगह ADS-B को कभी पूरी तरह लेनी ही नहीं थी, कार्यभार सँभाल लेता है। इस तरह दोनों का संबंध उत्तराधिकारी और पूर्ववर्ती का नहीं, बल्कि पूरक कमज़ोरियों वाले साझेदारों का है।

चूँकि अनिवार्यता यात्री विमानों और अधिकांश बड़े विमानों पर लागू है पर हर उड़ने वाली चीज़ पर नहीं, मैप अपनी रचना से ही अधूरा है। नियंत्रित हवाई क्षेत्र के बाहर के हल्के विमान, ग्लाइडर, गुब्बारे और बहुत से सैन्य विमान शायद ADS-B रखते ही न हों, और कुछ हल्के विमान ऐसी दूसरी प्रणालियों का उपयोग करते हैं जिन्हें 1090 MHz का रिसीवर नहीं सुनता। और चूँकि प्रसारण विमान की पहचान बताता है, वह उसके मालिक की पहचान भी बता सकता है: किसी खास निजी जेट का पीछा करना वास्तव में किसी खास व्यक्ति का पीछा करना है, जिसके कारण ऐसे कार्यक्रम बने हैं जो अनुरोध करने वाले मालिकों के विमानों का पंजीकरण छिपाते हैं, और एक चलती बहस भी कि जो सूचना विमान दुनिया को प्रसारित करता है, क्या वह निजी भी हो सकती है। यह बहस बड़े विद्यार्थियों के सामने रखने लायक है, क्योंकि भौतिकी इसका कोई उत्तर नहीं देती।

## अध्याय 12

# एक संक्षिप्त इतिहास

### 1935 से 1945

ब्रिटेन, जर्मनी और संयुक्त राज्य अमेरिका में प्राथमिक रडार विकसित हुआ; युद्ध के अंत तक "मित्र या शत्रु पहचान" ट्रांसपोंडर रडार स्पंदों का उत्तर एक कोडित उत्तर से देते हैं, जो द्वितीयक रडार का पूर्वज है।

### 1950 से 1960 का दशक

नागरिक द्वितीयक रडार मानकीकृत: 1030 MHz पर पूछताछ, 1090 MHz पर उत्तर, Mode A पहचान कोड और Mode C ऊँचाई।

### 1980 का दशक

अद्वितीय 24-बिट पतों और डेटा संदेशों वाला Mode S, MIT लिंकन प्रयोगशाला में विकसित और ICAO द्वारा अपनाया गया। GPS नागरिक उपयोगकर्ताओं के लिए चालू होता है।

### 1990 से 2000 का दशक

ADS-B परिभाषित और परीक्षित, विशेष रूप से अलास्का में, जहाँ रडार कवरेज असंभव थी और दुर्घटनाएँ आम थीं। 1090 MHz एक्सटेंडेड स्क्विटर अंतरराष्ट्रीय स्तर पर मानकीकृत होता है।

### 2010 का दशक

सस्ते सॉफ़्टवेयर-परिभाषित रेडियो ग्रहण को एक शौक बना देते हैं; हज़ारों रिसीवरों के स्वयंसेवी नेटवर्क उभरते हैं। महासागरीय कवरेज के लिए उपग्रहों पर रिसीवर प्रक्षेपित किए जाते हैं।

### 2020

संयुक्त राज्य अमेरिका (जनवरी) और यूरोपीय संघ (जून, वर्ष के अंत तक संक्रमण के साथ) में नियंत्रित हवाई क्षेत्र के अधिकांश विमानों के लिए ADS-B अनिवार्य हो जाता है। आसमान बोलने लगता है, हर जगह, हर समय।

## शब्दावली

### ADS-B

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast। विमानों द्वारा अपनी स्थिति का प्रसारण।

### वायुदाब-आधारित ऊँचाई

मानक वायुमंडल का उपयोग करके हवा के दाब से निकाली गई ऊँचाई; जो विमान रिपोर्ट करते हैं।

### CPR

कॉम्पैक्ट पोज़िशन रिपोर्टिंग, सम/विषम योजना जो एक सटीक स्थिति को 34 बिट में समा देती है।

### CRC

चक्रीय अतिरेक जाँच, हर संदेश के अंत में 24-बिट की त्रुटि-जाँच।

### एक्सटेंडेड स्क्विटर

112-बिट का स्वतः भेजा जाने वाला Mode S प्रसारण जो ADS-B ले जाता है।

### GNSS

वैश्विक नौवहन उपग्रह प्रणाली: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou।

### ICAO पता

विमान के ट्रांसपोंडर की स्थायी 24-बिट पहचान।

### Mode S

चयनात्मक द्वितीयक रडार मानक जिस पर ADS-B बना है।

### मल्टीलैटरेशन

कई रिसीवरों पर संकेत के आगमन-समय के अंतर से प्रेषक की स्थिति निकालना।

### पथ क्षय

दूरी के साथ संकेत का कमज़ोर होना, व्युत्क्रम वर्ग नियम के अनुसार।

### रेडियो क्षितिज

सबसे दूर की वह दूरी जिस पर एंटीना और विमान के बीच की सीधी रेखा पृथ्वी से नहीं टकराती।

### SDR

सॉफ़्टवेयर-परिभाषित रेडियो: एक ट्यूनर जो कच्चे संकेत-नमूने डिकोडिंग के लिए कंप्यूटर को सौंपता है।

### SSR

द्वितीयक निगरानी रडार: ज़मीन पूछताछ करती है, ट्रांसपोंडर उत्तर देता है।

### ट्रांसपोंडर

विमान का वह रेडियो जो रडार को उत्तर देता है और 1090 MHz पर ADS-B प्रसारित करता है।

### तरंगदैर्घ्य

तरंग के क्रमागत शिखरों के बीच की दूरी:  $c / f$ , 1090 MHz पर 27.5 cm।

## आगे

## सिद्धांत से व्यवहार तक: रिसीवर बनाएँ

बारह अध्यायों ने एक ऐसी प्रणाली समझाई जिसे अब आप अपने हाथ में थाम सकते हैं। व्यावहारिक कार्यशाला उन्हें एक दोपहर के काम में बदल देती है: 100 से 150 यूरो में क्या खरीदें, एंटीना कैसे बनाएँ और कहाँ लगाएँ, Raspberry Pi कैसे तैयार करें और Dataero फ़ीडर कैसे स्थापित करें, और जो विमान आप सुनते हैं उन्हें लाइव मैप पर, आपके स्टेशन के नाम से, दिखता हुआ कैसे देखें। ऊपर के हर अध्याय के लिए वहाँ एक माप प्रतीक्षा कर रहा है: असली विमानों के सामने रेडियो क्षितिज, संकेत के स्तंभ में व्युत्क्रम वर्ग नियम, आसमान की दैनिक लय।

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