

حوالہ جاتی کورس - ہر بالغ قاری کے لیے

ADS-B کیا ہے اور کیسے کام کرتا ہے

بارہ ابواب۔ ہوابازی یا ریڈیو کا کوئی پیشگی علم فرض نہیں کیا گیا؛ حل شدہ مثالوں کے لیے سیکنڈری اسکول کی ریاضی کافی ہے، اور انہیں چھوڑ دینے سے بھی بات کا سلسلہ نہیں ٹوٹتا۔ پڑھنے کا وقت تقریباً 50 منٹ۔

سیکھیں - <https://radar.dataero.eu/ur/learning/course> 2026-10-22

فہرست

- | | |
|--|---|
| باب 1 مسئلہ: طیاروں سے بھرا آسمان جیسے کوئی دیکھ نہیں سکتا | باب 8 - طبیعیات: اینٹینا: 27 سینٹی میٹر کی لہر کو پکڑنا |
| باب 2 ADS-B سے پہلے: ریڈار سے طیاروں کو ڈھونڈنا | باب 9 وصول کرنا اور ڈی کوڈ کرنا |
| باب 3 خیال: طیارے کو خود بتانے دیں | باب 10 ایک ریسپور سے ایک براعظم کے نقشے تک |
| باب 4 طیارہ کیسے جانتا ہے کہ وہ کہاں ہے | باب 11 یہ کس کام آتا ہے، اور کہاں کم پڑتا ہے |
| باب 5 ایک پیغام کی ساخت | باب 12 ایک مختصر تاریخ |
| باب 6 - طبیعیات: لہر: ریڈیو بطور نظر نہ آنے والی روشنی | فرہنگ |
| باب 7 - طبیعیات: حد: زمین کی گولائی اور سگنل کی کمزوری | آگے نظریے سے عمل تک: ریسپور بنائیں |

باب 1

مسئلہ: طیاروں سے بھرا آسمان جیسے کوئی دیکھ نہیں سکتا

ایک عام کام کے دن تقریباً 30,000 پروازیں یورپ کی فضائی حدود سے گزرتی ہیں۔ بلندی پر اڑتا مسافر طیارہ تقریباً 250 میٹر فی سیکنڈ، یعنی 900 km/h کی رفتار سے چلتا ہے؛ ایک دوسرے کی طرف آتے دو طیارے ہر سیکنڈ آدھا کلومیٹر قریب آ جاتے ہیں۔ کھڑکی سے باہر دیکھتے پائلٹ کو اس میں سے تقریباً کچھ نظر نہیں آتا: 10,000 میٹر کی بلندی پر دوسرے طیارے محض نقطے ہیں، اور بادل ویسے بھی ان میں سے بیشتر کو چھپا لیتے ہیں۔ آسمان ایک تین جھپتی سڑکوں کا جال ہے جس پر کوئی سڑک بنی ہوئی نہیں، اور اس پر چلنے والی ٹریفک تیز بھی ہے اور نظر نہ آنے والی بھی۔

ایئر ٹریفک کنٹرول اسی ٹریفک کو ایک دوسرے سے دور رکھنے کے لیے موجود ہے۔ اصول بنیادی طور پر سادہ ہیں: کنٹرولڈ فضائی حدود میں طیاروں کو عمودی طور پر کم از کم 1,000 فٹ (تقریباً 300 میٹر) یا افقی طور پر ایک مقررہ فاصلے پر رکھا جاتا ہے، جو ریڈار کوریج کے قریب عموماً 5 نائیکل میل (9.3 km) اور سمندروں پر اس سے کہیں زیادہ ہوتا ہے۔ ان اصولوں پر عمل کرنے کے لیے کنٹرولر کو اپنے سیکٹر کے ہر طیارے کا مقام مسلسل اور قابل اعتماد طریقے سے معلوم ہونا چاہیے: یہ نہیں کہ وہ ایک منٹ پہلے کہاں تھا، بلکہ یہ کہ وہ اب کہاں ہے، کتنا اونچا ہے، اور کس سمت جا رہا ہے۔ اس پورے کورس کا موضوع یہی ہے کہ یہ معلومات کیسے حاصل کی جاتی ہیں۔ اس کے لیے تکنیکی لفظ نگرانی (surveillance) ہے۔

ایک عدد جو یاد رکھیں

900 km/h کی رفتار سے ایک طیارہ ایک منٹ میں 15 km اور ایک سیکنڈ میں 250 m طے کرتا ہے۔ نگرانی کا کوئی بھی طریقہ جو سست روی سے یا بڑی غلطی کے ساتھ تازہ ہوتا ہے، کنٹرولر کو بالکل انہی فاصلوں پر اندازے لگانے پر مجبور کر دیتا ہے جو سب سے اہم ہیں۔

باب 2

ADS-B سے پہلے: ریڈار سے طیاروں کو ڈھونڈنا

پہلا جواب، جو 1930 کی دہائی کے آخر میں تیار ہوا اور دوسری جنگ عظیم کے دوران پختہ ہوا، **پرائمری ریڈار** تھا۔ ایک بڑا گھومتا ہوا اینٹینا ریڈیو توانائی کا ایک مختصر، نہایت طاقتور پلس (pulse) بھیجتا ہے۔ جب یہ پلس کسی طیارے سے ٹکراتا ہے تو اس کا ایک ننھا سا حصہ واپس منعکس ہو جاتا ہے۔ ریڈار پلس کے نکلنے اور بازگشت کے لوٹنے کے درمیان وقت ناپتا ہے؛ چونکہ ریڈیو روشنی کی رفتار، 300,000 km/s سے سفر کرتا ہے، یہ وقت فاصلہ بتا دیتا ہے۔ اینٹینا جس سمت میں تھا، وہ سمت بتا دیتا ہے۔ پرائمری ریڈار شاندار طور پر خود مختار ہے: طیارے کو کسی آلے کی ضرورت نہیں، اسی لیے فوج اسے آج بھی استعمال کرتی ہے۔ لیکن اس کی حقیقی کمزوریاں ہیں۔ دور کے طیارے کی بازگشت غیر معمولی حد تک کمزور ہوتی ہے، اس لیے ٹرانسمیٹر بہت بڑا ہونا چاہیے۔ بازگشت یہ کچھ نہیں بتاتی کہ طیارہ کون ہے یا کتنا اونچا ہے۔ اور اینٹینا کو ایک چکر مکمل کرنے میں کئی سیکنڈ لگتے ہیں، اس لیے ہر طیارہ ہر 4 سے 12 سیکنڈ میں صرف ایک بار نظر آتا ہے، اور اس دوران وہ 3 km تک آگے بڑھ چکا ہوتا ہے۔

دوسرے جواب، **سیکنڈری سرویلنس ریڈار (SSR)**، نے طیارے کو ایک شریک بنا دیا۔ ایک زمینی اسٹیشن 1030 MHz پر ایک سوال، یعنی **استفسار (interrogation)**، نشر کرتا ہے۔ طیارے پر نصب ایک چھوٹا ریڈیو، **ٹرانسپونڈر**، سوال سنتا ہے اور 1090 MHz پر اپنے ایک مضبوط سگنل سے جواب دیتا ہے۔ چونکہ جواب منعکس ہونے کے بجائے نشر کیا جاتا ہے، یہ ریڈار کی بازگشت سے لاکھوں گنا مضبوط ہوتا ہے، اور چونکہ اسے ایک کمپیوٹر بنانا ہے، یہ معلومات بھی لے جا سکتا ہے۔ سب سے پرانی شکل (Mode A) میں جواب میں کنٹرولر کا دیا ہوا چار ہندسوں کا شناختی کوڈ ہوتا ہے؛ Mode C میں طیارے کی بلندی بھی شامل ہوتی ہے۔ 1980 کی دہائی میں **Mode S** آیا ("S" یعنی selective، انتخابی)، جس میں ہر ٹرانسپونڈر کا ایک منفرد 24 بٹ ایڈریس ہوتا ہے، اس سے انفرادی طور پر استفسار کیا جا سکتا ہے، اور وہ 56 یا 112 بٹ کے ڈیٹا پیغامات سے جواب دے سکتا ہے۔ یہ عدد، 1090 MHz، اور یہ لفظ، Mode S، ذہن میں رکھیں: ADS-B براہ راست انہی دونوں پر بنا ہے۔

سیکنڈری ریڈار ایک بڑی بہتری تھی، لیکن اپنے پیشرو کی دو حدود اب بھی اس میں موجود ہیں۔ طیارہ صرف پوچھنے پر بولتا ہے، اس لیے زمین پر اب بھی حد میں ایک استفسار کرنے والا اسٹیشن درکار ہے، جو سمندروں، صحراؤں اور پہاڑی سلسلوں کو خارج کر دیتا ہے۔ اور اسٹیشن کو یہ جاننے کے لیے کہ جواب کس سمت سے آیا، اب بھی گھومتے اینٹینا کی ضرورت ہے، اس لیے ہر طیارہ اب بھی ہر چکر میں صرف ایک بار نظر آتا ہے، اور کنٹرولر کی اسکرین پر اب بھی ہموار حرکت کرتا طیارہ نہیں بلکہ ایک نقطہ دکھائی دیتا ہے جو ہر چند سیکنڈ بعد اچھلتا ہے۔ اس سے بہتر کرنے کے لیے کچھ بنیادی طور پر مختلف درکار تھا: ایک ایسا طریقہ جس سے طیارہ بغیر پوچھنے اپنا مقام بتا دے، اور زمین کو کچھ بھی ناپنا نہ پڑے۔

باب 3

خیال: طیارے کو خود بتانے دیں

1990 کی دہائی تک دو ٹیکنالوجیاں پختہ ہو چکی تھیں جنہوں نے ایک مختلف طریقہ ممکن بنایا۔ سیٹلائٹ نیویگیشن نے ہر مناسب آلات والے طیارے کو اپنے مقام کا درست علم دے دیا، جو کسی بھی ریڈار کے زمین سے ناپنے سے کہیں بہتر تھا۔ اور Mode S ٹرانسپونڈر پہلے ہی ایک ایسا ریڈیو فراہم کرتا تھا جو 1090 MHz پر ڈیٹا پیغامات بھیج سکتا تھا۔ دونوں کو ملا دیں تو منطق ناقابل تردید ہے: زمین کے طیارے کا مقام ناپنے کی جدوجہد کرنے کے بجائے، طیارہ، جو پہلے ہی جانتا ہے، باقاعدہ وقفوں سے سب کو خود بتا دے۔ یہی ADS-B ہے، اور اس کے نام کے چار لفظ اس کی ٹھیک ٹھیک تعریف ہیں۔

یہ **خودکار (automatic)** ہے: کوئی چیز ٹرانسمیشن شروع نہیں کرواتی۔ ٹرانسپونڈر اپنے شیڈول پر بھیجتا ہے، سیکنڈ میں تقریباً دو بار، چاہے کوئی زمینی اسٹیشن حد میں ہو یا نہ ہو اور چاہے پائلٹ کچھ کرے یا نہ کرے؛ بلکہ پائلٹ ٹرانسپونڈر بند کیے بغیر پرواز میں اسے روک ہی نہیں سکتا، اور ٹرانسپونڈر بند کرنا ممنوع ہے۔ یہ **منحصر (dependent)** ہے: پیغام کی ہر چیز طیارے کے اپنے آلات سے آتی ہے، مقام اس کے سیٹلائٹ ریسیور سے اور بلندی اس کے پریشر الٹی میٹر سے، اور زمین کچھ نہیں ناپتی؛ جو بتایا جاتا ہے اس پر بھروسا کرتی ہے۔ یہ **نگرانی (surveillance)** ہے: اس کا مقصد دوسروں کو یہ بتانا ہے کہ طیارہ کہاں ہے، ایئر ٹریفک کنٹرول اور قریبی طیاروں

کے لیے؛ یہ نیویگیشن سے الگ ہے، جو طیارے کا خود جاننا ہے کہ وہ کہاں ہے، اور مواصلات سے الگ ہے، جو پائلٹ سے بات کرنا ہے۔ اور یہ **نشریات (broadcast)** ہے: پیغام کا کوئی مخاطب نہیں، کوئی تصدیقی جواب نہیں اور کوئی خفیہ کاری نہیں، اور حد میں موجود ریسپور والا ہر شخص بالکل وہی سنتا ہے، چاہے وہ کنٹرول سینٹر ہو، دوسرا مسافر طیارہ ہو، یا کوئی اسکول۔

"منحصر" وہ لفظ ہے جو انجینئروں کو فکرمند کرتا ہے اور جس کی وضاحت سب سے زیادہ فائدہ دیتی ہے۔ ریڈار ایک آزاد پیمائش کرتا ہے: اگر طیارے کے آلات غلط ہوں تو ریڈار کو کوئی فرق نہیں پڑتا۔ ADS-B طیارے کے اپنے نیویگیشن نظام کی ہر غلطی وراثت میں لیتا ہے، اور اگر وہ نظام دھوکا کھا جائے یا ناکام ہو جائے تو نشر کیا گیا مقام اسی اعتماد کے ساتھ غلط ہوتا ہے۔ اسی لیے ہر ADS-B پیغام مقام کے ساتھ ساتھ یہ بیان بھی لے جاتا ہے کہ طیارہ اپنے مقام پر کتنا بھروسا کرتا ہے (سالمیت اور درستگی کے وہ زمرے جن سے ہم باب 5 میں ملیں گے)، اور اسی لیے ریڈار بند نہیں کیا گیا۔

"نشریات" وہ لفظ ہے جو اس کورس کو ممکن بناتا ہے۔ چونکہ پیغامات کھلے عام سب کو بھیجے جاتے ہیں، انہیں صرف ایئر ٹریفک کنٹرول ہی نہیں بلکہ 1090 MHz پر ٹیون کیا ہوا ہر ریسپور سنتا ہے، بشمول وہ جو آپ اسکول کی چھت پر لگا سکتے ہیں۔ یہی خاصیت نظام کی سب سے بڑی حد کا سرچشمہ بھی ہے، جس پر باب 11 میں بات ہوگی: جو پیغام کوئی بھی پڑھ سکتا ہے، وہ پیغام کوئی بھی جعلی بھی بنا سکتا ہے۔

باب 4

طیارہ کیسے جانتا ہے کہ وہ کہاں ہے

ADS-B کی ہر چیز اس بات پر ٹکی ہے کہ طیارہ اپنا مقام خود جانتا ہے، اس لیے یہ باب سیٹلائٹ نیویگیشن کے بارے میں ہے۔ عمومی اصطلاح **GNSS** ہے، Global Navigation Satellite System (عالمی نیویگیشن سیٹلائٹ نظام)؛ امریکی GPS سب سے مشہور ہے، اور یورپ کا Galileo، روس کا GLONASS اور چین کا BeiDou اسی اصول پر کام کرتے ہیں۔ ہر نظام تقریباً 24 سے 30 سیٹلائٹس کا ایک جھرمٹ ہے جو تقریباً 20,000 km کی بلندی پر، طیاروں سے بہت اوپر، زمین کے گرد گردش کرتا ہے، اور ہر ایک میں ایک ایٹمی گھڑی ہے جو ایک سیکنڈ کے چند اربوبیں حصے تک درست ہے۔ ہر سیٹلائٹ مسلسل ایک ریڈیو سگنل نشر کرتا ہے جو دراصل کہتا ہے: "میں سیٹلائٹ نمبر N ہوں، میرا مقام فلاں ہے، اور میں نے یہ بالکل وقت T پر بھیجا ہے۔"

طیارے پر لگا ریسپور یہ سگنل تھوڑی دیر بعد سنتا ہے، کیونکہ ریڈیو کو سفر کرنے میں وقت لگتا ہے: 300,000 km/s کی رفتار سے سیٹلائٹ کے 20,000 km طے کرنے میں ایک سیکنڈ کے تقریباً 67 ہزاروبیں حصے لگتے ہیں۔ ریسپور پیغام میں درج وقت کا موازنہ آمد کے وقت سے کرتا ہے۔ فرق کو روشنی کی رفتار سے ضرب دیں تو اس سیٹلائٹ تک کا فاصلہ مل جاتا ہے۔ ایک فاصلہ ریسپور کو اس سیٹلائٹ کے گرد ایک کرے (sphere) پر کہیں رکھتا ہے۔ دو کرے ایک دائرے میں ملتے ہیں؛ تین کرے دو نقطوں میں، جن میں سے ایک عموماً بے تکا ہوتا ہے (زمین کے اندر گہرائی میں یا خلا میں بہت دور) اور رد کر دیا جاتا ہے۔ تو تین سیٹلائٹ کافی ہوتے، اگر ریسپور کے پاس ایک کامل گھڑی ہوتی۔

اس کے پاس نہیں ہے۔ ایٹمی گھڑی کی قیمت دسیوں ہزار یورو ہے اور وہ سمائے گی بھی نہیں؛ ریسپور کے پاس ایک سستی کوارٹز گھڑی ہے جو درکار ٹائمنگ کی باریکی سے کہیں زیادہ غلط ہو سکتی ہے۔ یہاں وہ خوبصورت حصہ آتا ہے۔ ریسپور اپنی گھڑی کی غلطی کو اپنے تین مقامی محدّدات (coordinates) کے ساتھ چوتھا نامعلوم مان لیتا ہے اور ایک چوتھے سیٹلائٹ کو سنتا ہے۔ چار مساواتیں، چار نامعلوم؛ ریسپور اپنا مقام حل کر لیتا ہے اور ضمنی طور پر اپنی گھڑی کو چند دسیوں نینو سیکنڈ تک درست کر لیتا ہے۔ اسی لیے ایک سیٹلائٹ ریسپور کو کم از کم چار سیٹلائٹ نظر میں چاہییں، اور اسی لیے ہر GNSS ریسپور ضمنی طور پر عمارت کی سب سے درست گھڑیوں میں سے ایک بھی ہوتا ہے۔

مقداروں پر ٹھہرنا فائدہ مند ہے، کیونکہ وہ بتاتی ہیں کہ سیٹلائٹ نیویگیشن دراصل وقت ناپنے کی مشق ہے جس میں جیومیٹری ایک ضمنی بات ہے۔ روشنی ایک نینو سیکنڈ میں 30 سینٹی میٹر اور ایک مائیکرو سیکنڈ میں 300 میٹر طے کرتی ہے، اس لیے ایک ملین ویں سیکنڈ کی ٹائمنگ کی غلطی 300 میٹر کے مقام کی غلطی بن جاتی ہے، اور جدید ریسپور کی چند میٹر کی درستگی تقریباً دس نینو سیکنڈ

کی سطح کی ٹائمنگ کے مساوی ہے۔ ایک ٹھوس مثال لیں۔ ایک سیٹلائٹ سگنل پر وقت 12:00:00.000000000 درج کرتا ہے؛ طیارے کا ریسپور اسے 12:00:00.070000000 پر سنتا ہے۔ سفر کا وقت 0.070 s ہے، اس لیے فاصلہ $300,000 \text{ km/s} \times 0.070 = 21,000 \text{ km}$ ہے۔ اگر ریسپور کی اپنی گھڑی ایک مائیکرو سیکنڈ آگے ہوتی تو اس نے 21,000.3 km نکالا ہوتا، 300 میٹر زیادہ، اور یہی غلطی ہر دوسرے سیٹلائٹ کے فاصلے میں بھی گھس آئی ہوتی۔ یہی مشترک غلطی ہے جسے چوتھا سیٹلائٹ بے نقاب کرتا اور ختم کرتا ہے۔

دو بلندیاں، ایک نہیں

سیٹلائٹ زمین کی ریاضیاتی سطح سے اوپر بلندی دیتے ہیں، ایک جیومیٹرک بلندی۔ لیکن طیارہ ایئر ٹریفک کے مقاصد کے لیے جو بلندی نشر کرتا ہے وہ یہ نہیں ہے۔ وہ **بیرومیٹرک بلندی (barometric altitude)** ہے، جو طیارے کے باہر ہوا کے دباؤ سے اخذ کی جاتی ہے، اور جسے طیارے کے ڈھانچے میں سٹیٹک پورٹ نامی ایک چھوٹا سوراخ ناپتا ہے۔ ہوا کا دباؤ بلندی کے ساتھ ایک معلوم طریقے سے گرتا ہے (زمین کے قریب تقریباً 1 hPa فی 8 میٹر، اوپر جا کر آہستہ)، اور دنیا کا ہر الٹی میٹر دباؤ کو بلندی میں بدلنے کے لیے ایک ہی معیاری فضا استعمال کرتا ہے، جس کا حوالہ سطح سمندر پر 1013.25 hPa ہے۔ غیر معمولی دباؤ والے دن ہر طیارے کی بیرومیٹرک بلندی ایک ہی مقدار سے غلط ہوتی ہے، اور یہی اصل بات ہے: فاصلہ رکھنے کے لیے اہم یہ نہیں کہ سمندر سے حقیقی بلندی کیا ہے، بلکہ یہ کہ "فلاٹ لیول 350" پڑھنے والے دو طیارے "فلاٹ لیول 340" پڑھنے والے طیارے سے واقعی 300 میٹر دور ہوں۔ ADS-B اپنے مقام کے پیغامات میں بیرومیٹرک بلندی 25 فٹ (7.6 m) کے قدموں میں نشر کرتا ہے، اور الگ سے اس کا سیٹلائٹ بلندی سے فرق بھی نشر کرتا ہے، تاکہ ریسپور دونوں حاصل کر سکے۔

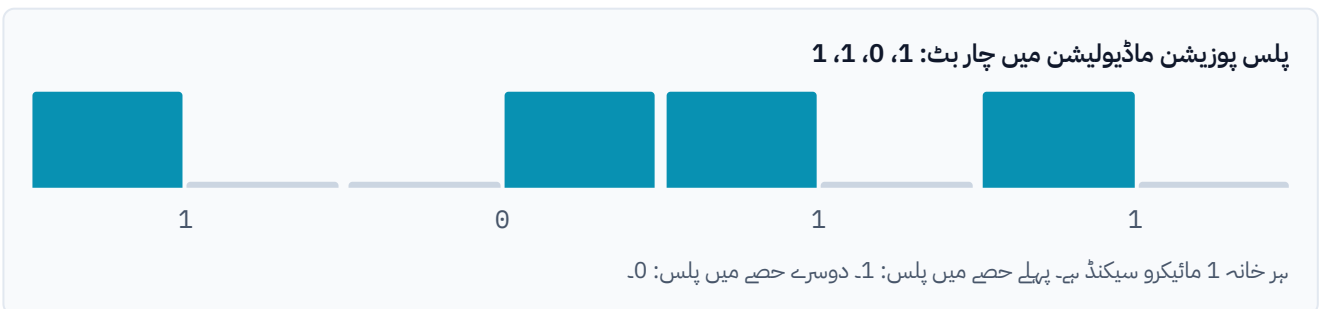
باب 5

ایک پیغام کی ساخت

دنیا بھر کے مسافر طیارے جو ADS-B پیغام استعمال کرتے ہیں وہ ایک Mode S ٹرانسمیشن ہے جسے **ایکسٹینڈڈ سکوئٹر (extended squitter)** کہتے ہیں؛ "squitter" ریڈار کی پرانی اصطلاح ہے اس ٹرانسمیشن کے لیے جو جواب میں نہیں بلکہ خود بخود بھیجی جائے، اور "extended" اس لیے کہ 112 بٹ پر یہ اصل Mode S جواب سے دگنی لمبی ہے۔ انجینئر "1090 MHz extended squitter" کے لیے "1090ES" لکھتے ہیں۔ ہر ٹرانسمیشن کل 120 مائیکرو سیکنڈ چلتی ہے: ایک 8 مائیکرو سیکنڈ کا پری امبل (preamble)، چار پلسوں کا ایک مقررہ نمونہ جو ریسپور کو پیغام کا آغاز پہچاننے اور اپنی گھڑی ہم آہنگ کرنے دیتا ہے، اور اس کے بعد ایک بٹ فی مائیکرو سیکنڈ کی رفتار سے 112 ڈیٹا بٹ۔

ایک بٹ کیسے بھیجا جاتا ہے: پلس پوزیشن ماڈیولیشن

ایک مائیکرو سیکنڈ کے ہر بٹ خانے کو دو حصوں میں بانٹا جاتا ہے۔ پہلے حصے میں ریڈیو توانائی کا پلس اور دوسرے میں خاموشی کا مطلب 1 ہے؛ پہلے خاموشی پھر پلس کا مطلب 0۔ لہذا ڈیٹا کچھ بھی ہو، ہر بٹ میں بالکل ایک پلس ہوتا ہے، اور ریسپور کو صرف یہ فیصلہ کرنا ہے کہ ہر خانے کا کون سا حصہ زیادہ بلند تھا۔ یہ طریقہ، پلس پوزیشن ماڈیولیشن (pulse position modulation)، اس قسم کے شور اور کمزوری کے خلاف مضبوط ہے جو سگنل ٹرانسپونڈر سے دور کے اینٹینا تک جاتے ہوئے جھیلتا ہے، اور اسے ڈی کوڈ کرنا سستا ہے۔



112 بٹ

DF	CA	ایڈریس ICAO	اصل مواد - ME	PI
بٹ 5 ڈاؤن لنک فارمیٹ	بٹ 3 کیپیبلٹی	بٹ 24 طیارے کی منفرد شناخت	بٹ 56 مقام، بلندی، رفتار، کال سائن یا حالت، اس کے پہلے 5 بٹ میں موجود ٹائپ کوڈ کے مطابق	بٹ 24 (CRC) غلطی کی جانچ

پہلے پانچ بٹ، ڈاؤن لنک فارمیٹ، بتاتے ہیں کہ یہ کس قسم کا Mode S پیغام ہے؛ قدر 17 کا مطلب ہے "Mode S ٹرانسپونڈر سے ADS-B"۔ 24 بٹ کا ICAO ایڈریس طیارے کی مستقل شناخت ہے، جو رجسٹریشن کے وقت دی جاتی ہے: 2 کی طاقت 24، یعنی 16,777,216 ممکنہ ایڈریس ہیں، جو اقوام متحدہ کے شہری ہوابازی کے ادارے ICAO کی طرف سے ریاستوں کو بلاکوں میں دیے جاتے ہیں۔ مثلاً بیلجیئم طیاروں کے ایڈریس ہیکساڈسیمیل میں 448000 سے 44FFFF تک ہیں۔ پرانے Mode A کے چار ہندسوں کے کوڈ کے برعکس، یہ ایڈریس کبھی نہیں بدلتا اور کبھی مشترک نہیں ہوتا، اس لیے ریسپور پہلے ہی پیغام سے یقین سے جان سکتا ہے کہ وہ کس طیارے کو سن رہا ہے۔

56 بٹ کی ME فیلڈ اصل مواد ہے، اور اس کے پہلے پانچ بٹ، ٹائپ کوڈ، بتاتے ہیں کہ باقی کیا مطلب ہے۔ ٹائپ کوڈ 1 سے 4 طیارے کا کال سائن لے جاتے ہیں، جیسے BEL1234 یا RYR7KL، آٹھ چھ بٹ والے حروف کی صورت میں۔ کوڈ 9 سے 18 فضا میں مقام بیرومیٹرک بلندی کے ساتھ لے جاتے ہیں؛ 20 سے 22 وہی سیٹلائٹ بلندی کے ساتھ۔ کوڈ 19 رفتار لے جاتا ہے: زمینی رفتار مشرق-مغرب اور شمال-جنوب اجزا میں بٹی ہوئی، عمودی رفتار، اور بیرومیٹرک اور سیٹلائٹ بلندی کا فرق۔ کوڈ 28، 29 اور 31 حالت لے جاتے ہیں: ہنگامی کوڈ، منتخب بلندی، اور سالمیت (integrity) اور درستگی (accuracy) کے وہ زمرے جو بتاتے ہیں کہ نشر کیے گئے مقام پر کتنا بھروسہ کیا جا سکتا ہے (مثلاً 8 کا "NIC" وعدہ کرتا ہے کہ حقیقی مقام بہت زیادہ امکان کے ساتھ بتائے گئے مقام کے 185 m کے اندر ہے)۔

آخری 24 بٹ ایک سائیکلک ریڈنڈنسی چیک (cyclic redundancy check) ہیں، ایک عدد جو پچھلے 88 بٹ سے ایک مقررہ کثیر رکنی تقسیم کے ذریعے نکالا جاتا ہے۔ ریسپور ڈی کوڈ کیے گئے بٹس پر یہی حساب دہراتا ہے؛ اگر نتیجہ نہ ملے تو راستے میں کم از کم ایک بٹ خراب ہوا ہے اور پیغام رد کر دیا جاتا ہے۔ چونکہ ایک مائیکرو سیکنڈ کا پلس آسانی سے شور میں یا کسی دوسرے طیارے کے اوپر چڑھے پیغام میں کھو سکتا ہے، یہی جانچ گزرتا شدہ مقامات کو کنٹرولر کی اسکرین سے دور رکھتی ہے۔ ایک حقیقی پیغام، جیسا کہ ریسپور اسے ریکارڈ کرے گا، ایسا نظر آتا ہے:

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: ڈاؤن لنک فارمیٹ 17، کیپیبلٹی 5: ICAO 4840D6: ایڈریس، ایک ڈچ طیارہ۔ 20...: ٹائپ کوڈ 4، ایک شناختی پیغام، جو ڈی کوڈ ہو کر کال سائن KLM1023 بنتا ہے۔ 576098: غلطی کی جانچ۔

زمین کو 34 بٹ میں سمونا

مقام کے پیغام میں عرض بلد کے لیے صرف 17 بٹ اور طول بلد کے لیے 17 بٹ ہیں۔ یہ پوری زمین کے گرد 131,072 قدم ہیں، خط استوا پر تقریباً 300 m ہر ایک: ہرگز کافی نہیں۔ ADS-B اسے کمپیکٹ پوزیشن رپورٹنگ (compact position reporting) سے حل کرتا ہے۔ زمین کو زونوں میں بانٹا جاتا ہے؛ 17 بٹ ایک زون کے اندر بہت درست مقام دیتے ہیں (تقریباً 5 m تک)، لیکن یہ نہیں کہ کون سا زون۔ طیارہ دو قدرے مختلف زون گزروں، "جفت" اور "طاق" پیغامات، کے درمیان باری باری بدلتا رہتا ہے، اور جس ریسپور نے دونوں میں سے ایک ایک سن لیا ہو وہ زون بلا ابہام معلوم کر سکتا ہے۔ ایک باریہ ہو جائے تو طیارے کا پیچھا کرنے کے لیے ایک پیغام کافی ہے، کیونکہ آدھے سیکنڈ میں وہ کسی دوسرے زون میں کود نہیں سکتا۔ یہ ایک عمدہ ترکیب ہے جو بٹس کی کوئی قیمت دیے بغیر مفید درستگی دگنی کر دیتی ہے۔

کتی بار

پرواز میں ٹرانسپونڈر مقام کا پیغام سیکنڈ میں دو بار، رفتار کا پیغام سیکنڈ میں دو بار، اور اپنا کال سائن ہر پانچ سیکنڈ بعد بھیجتا ہے، نیز حالت کے پیغامات لمبے وقفوں سے، یعنی کل ملا کر سیکنڈ میں تقریباً چار سے پانچ ایکسٹینڈڈ سکوئٹر۔ ہر ایک 120 مائیکرو سیکنڈ چلتا ہے، ٹرانسپونڈر دراصل وقت کے ایک ہزارویں حصے سے بھی بہت کم ADS-B نشر کر رہا ہوتا ہے۔ باقی سیکنڈ میں وہ 1030 MHz پر ریڈار کے استفسارات اور دوسرے طیاروں کے تصادم سے بچاؤ کے سوالات سن رہا اور ان کا جواب دے رہا ہوتا ہے۔

باب 6 - طبیعیات

لہر: ریڈیو بطور نظر نہ آنے والی روشنی

پیغام طیارے سے ایک ریڈیو لہر کی صورت میں نکلتا ہے، اور اس کورس کا سب سے مفید خیال یہ ہے کہ ریڈیو لہر اور روشنی کی شعاع ایک ہی چیز ہیں۔ دونوں برقی مقناطیسی لہریں (electromagnetic waves) ہیں: برقی اور مقناطیسی میدانوں کا ایک نمونہ جو ایک ساتھ ارتعاش کرتا ہوا خلا میں روشنی کی رفتار c سے سفر کرتا ہے، جو 299,792,458 میٹر فی سیکنڈ ہے، یعنی تقریباً 300,000 km/s۔ ریڈیو لہر کو سبز روشنی سے، ہسپتال کی ایکس ریز سے یا باورچی خانے کے اوون کی مائیکرو ویوز سے جو چیز الگ کرتی ہے وہ صرف یہ ہے کہ میدان کتنی تیزی سے ارتعاش کرتے ہیں: **فریکوئنسی (تعدد، frequency)**، f، جو ہرٹز (ارتعاش فی سیکنڈ) میں ناپی جاتی ہے۔

چونکہ لہر ایک مقررہ رفتار سے سفر کرتی ہے، فریکوئنسی ایک چوٹی سے اگلی چوٹی تک کا فاصلہ طے کر دیتی ہے، یعنی **طول موج (wavelength)**، lambda۔ ایک سیکنڈ میں لہر c میٹر سفر کرتی ہے اور f ارتعاش مکمل کرتی ہے، اس لیے ہر ارتعاش c / f میٹر گھیرتا ہے:

$$c = f \times \lambda$$

cm - طیارے اور آپ کے اینٹینا کے درمیان لہر کی چوٹیاں 0.275 m 27.5 = 300,000,000 / 1,090,000,000 = lambda = کے لیے ADS-B کے فاصلے پر ہیں، تقریباً اسکول کے فٹ رول جتنی لمبائی۔

لہر	فریکوئنسی	طول موج	نوٹ
FM نشریاتی ریڈیو	100 MHz	3 m	گاڑی کے اینٹینا اس کا ایک حصہ ہوتے ہیں
ADS-B / Mode S	1,090 MHz	27.5 cm	ریڈار ٹرانسپونڈر کے جوابات بھی اسی پر
موبائل فون (4G بینڈ)	1,800 MHz	17 cm	طیف میں ایک قریبی پڑوسی
Wi-Fi، مائیکرو ویو اوون	2,450 MHz	12 cm	ایک ہی فریکوئنسی، بہت مختلف طاقت
نظر آنے والی سبز روشنی	560,000,000 MHz	0.00054 mm	فریکوئنسی میں پانچ لاکھ گنا زیادہ

آگے آنے والی ہر چیز کے لیے دو نتائج اہم ہیں۔ پہلا، چونکہ لہر روشنی ہے، یہ سیدھی لکیروں میں سفر کرتی ہے جب تک کوئی چیز اسے موڑے یا روکے نہیں، اور یہ زمین کے آر پار نہیں جاتی۔ یہی نظام کی حد مقرر کرتا ہے، جو باب 7 کا موضوع ہے۔ دوسرا، چونکہ اس کا طول موج 27.5 cm ہے، وہ دھاتی ڈھانچے جو اس کے ساتھ سب سے مضبوطی سے عمل کرتے ہیں، یعنی اینٹینا، اسی درجے کے سائز کے ہوتے ہیں، جو باب 8 کا موضوع ہے۔

ریڈیو آواز کیوں نہیں ہے

سب سے عام الجھن، بڑوں میں اتنی ہی جتنی بچوں میں، ریڈیو اور آواز کے درمیان ہے، غالباً اس لیے کہ "ریڈیو" ایک ڈبہ ہے جو آواز پیدا کرتا ہے۔ یہ دو غیر متعلق مظاہر ہیں۔ آواز ہوا میں دباؤ کی لہر ہے، مالیکیولوں کی ایک زنجیر جو اپنے پڑوسیوں کو دھکیلتی ہے؛ اسے سفر کے لیے مادے کی ضرورت ہے، یہ 340 m/s سے چلتی ہے، اور خلا کو عبور نہیں کر سکتی۔ ریڈیو کو کچھ نہیں چاہیے: یہ سیٹلائٹ اور

طیارے کے درمیان خلا عبور کرتا ہے، اور تقریباً دس لاکھ گنا تیز چلتا ہے۔ طیارے کے انجن کا شور اور اس کا ADS-B پیغام ایک ہی لمحے اس سے نکلتے ہیں؛ پیغام 20 km دور ریسپور تک 67 مائیکرو سیکنڈ میں پہنچ جاتا ہے، آواز پورے ایک منٹ بعد۔

1090 MHz کیوں

یہ فریکوئنسی ایک وراثت ہے۔ 1950 کی دہائی کے بین الاقوامی معاہدوں نے 960 سے 1215 MHz کا بینڈ ہوابازی کی ریڈیو نیویگیشن کے لیے مخصوص کیا، اور 1090 MHz سیکنڈری ریڈار ٹرانسپونڈروں کی جوابی فریکوئنسی بن گئی۔ جب ADS-B ڈیزائن کیا گیا تو ہر مسافر طیارے میں پہلے سے نصب ٹرانسپونڈر کو دوبارہ استعمال کرنا نیا ریڈیو لگانے سے کہیں سستا تھا، اس لیے ADS-B بس ایک اور چیز بن گیا جو Mode S ٹرانسپونڈر 1090 MHz پر کہتا ہے۔ امریکہ میں تقریباً 5,500 m سے نیچے اڑنے والے چھوٹے طیارے اس کے بجائے ایک دوسرا نظام، 978 MHz پر UAT، استعمال کر سکتے ہیں، اسی لیے وہاں ریسپور اکثر دونوں سنتے ہیں۔

باب 7 - طبیعیات

حد: زمین کی گولائی اور سگنل کی کمزوری

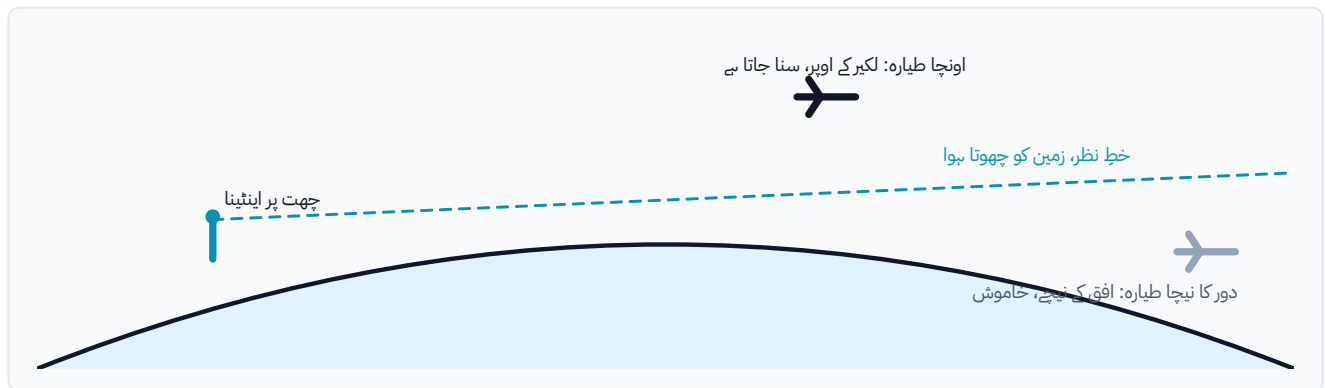
ٹرانسپونڈر چند سو واٹ کی چوٹی طاقت سے نشر کرتا ہے۔ ایسا سگنل کتنی دور سے سنا جا سکتا ہے؟ دو بالکل مختلف چیزیں اسے محدود کرتی ہیں، اور انہیں الگ رکھنا فائدہ مند ہے: جیومیٹری، جو ایک سخت کنارہ بناتی ہے، اور طاقت، جو ایک نرم کنارہ بناتی ہے۔

ریڈیو افق

1090 MHz پر ریڈیو روشنی کی طرح برتاؤ کرتا ہے: یہ سیدھی لکیروں میں سفر کرتا ہے اور زمین کے گرد نہیں مڑتا۔ لہذا زمینی اینٹینا طیارے کو صرف اس وقت تک سن سکتا ہے جب تک ان کے درمیان ایک ایسی سیدھی لکیر ہو جو زمین میں سے نہ گزرے۔ سطح پر کھڑے مشاہدہ کرنے والے کے لیے افق وہ جگہ ہے جہاں یہ لکیر زمین کو بس چھوتی ہے۔ طیارہ جتنا اونچا، یہ چھونے کا نقطہ اتنا دور؛ اینٹینا جتنا اونچا، اتنا ہی اور دور۔ کرے پر مماس (tangent) کی جیومیٹری ایک سادہ نتیجہ دیتی ہے: افق تک کا فاصلہ کلومیٹر میں بلندی (میٹر میں) کے جذر کا تقریباً 3.57 گنا ہے۔ فضا ریڈیو کو تھوڑا سا نیچے کی طرف موڑتی ہے، جو افق کو تقریباً 15 فیصد بڑھا دیتا ہے، اس لیے انجینئر 3.57 کے بجائے 4.12 استعمال کرتے ہیں:

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h \text{ (طیارہ)}} + \sqrt{h \text{ (اینٹینا)}})$$

11,000 m طیارہ 4.12 x پر، وہی چھت: 4.12 m - طیارہ 1,000 x (104.9 + 4.5) = 451 km اونچی چھت پر: 4.12 m پر، اینٹینا 20 m طیارہ 11,000 دور کھڑا طیارہ: بالکل نہیں سنا جاتا، جب تک درمیان کی زمین ہموار اور صاف نہ ہو۔ km - زمین پر 15 km = 149 km - 4.5)



یہی ریسپور کی کوریج کی مخصوص شکل کی وضاحت کرتا ہے: اونچی اڑان والی ٹریفک کے لیے 400 km یا زیادہ کا دائرہ، لینڈنگ کے قریب آتے طیاروں کے لیے سکڑ کر چند دسیوں کلومیٹر، اور زمین پر کھڑے طیاروں کے لیے تقریباً کچھ نہیں سوائے برابر والے ایئرپورٹ کے۔ یہ بھی بتاتا ہے کہ ریسپور کی بلندی ریسپور کے معیار سے کہیں زیادہ اہم کیوں ہے، اور کیوں ایک پہاڑی، ایک اونچی عمارت یا حتیٰ کہ

طیارے کا اپنا پر، جب وہ آپ سے دور کی طرف جھکتا ہے، سگنل کو فوراً کاٹ سکتا ہے۔

معکوس مربع قانون

افق کے اندر سگنل فاصلے کے ساتھ کمزور ہوتا ہے۔ ٹرانسپونڈر کا اینٹینا تمام افقی سمتوں میں شعاع ریزی کرتا ہے، اس لیے اس کی طاقت ایک مسلسل بڑھتے کرے پر پھیلتی ہے۔ کرے کا رقبہ اس کے رداس کے مربع کے ساتھ بڑھتا ہے، اس لیے مقررہ سائز کے اینٹینا پر پڑنے والی طاقت فاصلے کے مربع کے ساتھ گرتی ہے: دگنا دور، چوتھائی طاقت؛ دس گنا دور، سوواں حصہ۔ انجینئر اسے ڈیسی بل میں پاتھ لاس (*path loss*) کہتے ہیں، اور 1090 MHz پر 400 km کے لیے یہ تقریباً 145 dB بنتا ہے، یعنی وصول ہونے والی طاقت نشر کی گئی طاقت سے تقریباً 10 کی طاقت 14.5 گنا چھوٹی ہے۔ 250 واٹ کا پلس تقریباً ایک ملی واٹ کے دسویں اربوں حصے کے برابر پہنچتا ہے۔ ایک اچھا ریسپور اسے بمشکل پکڑ سکتا ہے، اسی لیے جیومیٹرک افق اور طاقت کی حد اتفاقاً چند سو کلومیٹر پر ہی ملتی ہیں: نظام ایسے ہی ڈیزائن کیا گیا تھا۔

یہ دونوں حدیں ایک ایسے طریقے سے ایک دوسرے پر اثر ڈالتی ہیں جسے سمجھنا فائدہ مند ہے۔ افق کے اندر، قریبی طیارے کا مضبوط سگنل اور دور کے طیارے کا کمزور سگنل دونوں بالکل ٹھیک ڈی کوڈ ہوتے ہیں، کیونکہ باب 5 کا پلس پوزیشن طریقہ صرف یہ پوچھتا ہے کہ ہر بٹ خانے کا کون سا حصہ زیادہ بلند تھا، یہ نہیں کہ کتنا بلند۔ طیارے کے دور ہوتے جانے کے ساتھ سگنل رفتہ رفتہ بیکار نہیں ہوتا جاتا؛ یہ اس وقت تک ڈی کوڈ ہوتا رہتا ہے جب تک، افق کے قریب کہیں، یا تو جیومیٹری اسے کاٹ دیتی ہے یا ریسپور کا شور آخرکار اسے ڈبو دیتا ہے، اور ٹریک رک جاتا ہے۔ اسی لیے کوریج کے نقشوں کے کنارے تیز ہوتے ہیں، اور اسی لیے ریسپور جو سب سے دور کے طیارے سنتا ہے وہ تقریباً ہمیشہ سب سے اونچے ہوتے ہیں۔

باب 8 - طبیعیات

اینٹینا: 27 سینٹی میٹر کی لہر کو پکڑنا

اینٹینا ایک موصل (conductor) کا ٹکڑا ہے جس کی شکل ایسی ہے کہ گزرتی ہوئی برقی مقناطیسی لہر اس کے الیکٹرانوں کو اپنے ساتھ ہم قدم حرکت دیتی ہے، جس سے ایک ننھا سا متبادل کرنٹ پیدا ہوتا ہے جسے ریسپور بڑھا سکتا ہے۔ ٹرانسمیٹر میں اس کا الٹ ہوتا ہے: طیارے کے اینٹینا میں متبادل کرنٹ لہر کو روانہ کرتا ہے۔ اس تبادلے کی کارکردگی موصل کے سائز اور طول موج کے تناسب پر منحصر ہے۔ ایک سیدھی تار سب سے مضبوط ردعمل دیتی ہے، اس میں گمک (*resonance*) پیدا ہوتی ہے، جب وہ آدھے طول موج جتنی لمبی ہو، تاکہ اس میں آگے پیچھے بہتا کرنٹ لہر کے ارتعاش میں بالکل فٹ آئے، جیسے بچے کا جھولا اس کی اپنی فطری تال پر دھکیلا جائے۔ 1090 MHz کے لیے آدھا طول موج 13.75 cm ہے۔

سب سے عام عملی شکل چوتھائی طول موج مونوپول (*quarter-wave monopole*) ہے: ایک عمودی سلاخ جو طول موج کا ایک چوتھائی، 6.9 cm، لمبی ہو اور ایک موصل سطح، گراؤنڈ پلین (*ground plane*)، پر کھڑی ہو۔ گراؤنڈ پلین آئینے کا کام کرتا ہے، اس لیے سلاخ اور اس کا عکس مل کر آدھے طول موج کے اینٹینا کی طرح برتاؤ کرتے ہیں۔ اسی لیے طیارے پر ADS-B اینٹینا ڈھانچے پر چند سینٹی میٹر اونچا ایک چھوٹا سا بلیڈ ہوتا ہے، جس میں ڈھانچہ گراؤنڈ پلین ہے، اور اسی لیے شوقیہ اینٹینا ٹین کے ڈھکن پر ایک چھوٹی تار ہوتا ہے۔ غلط لمبائی کی تار بھی کام کرتی ہے، لیکن بہت کم: "دھات کا کان" ٹیون کیا ہوا ہے۔

اینٹینا کی تین مزید خصوصیات طبیعیات سے نکلتی ہیں اور ہر ایک کا ایک نظر آنے والا نتیجہ ہے۔ پہلی پولرائزیشن (*polarisation*) ہے۔ برقی مقناطیسی لہر کا برقی میدان اپنے سفر کی سمت کے قائمہ زاویے پر ایک متعین سمت میں ارتعاش کرتا ہے، اور اینٹینا صرف میدان کے اس جزو پر ردعمل دیتا ہے جو اس کی اپنی لمبائی کے ساتھ ہو۔ طیاروں کے اینٹینا عمودی لگائے جاتے ہیں، اس لیے ADS-B لہر عمودی پولرائزیشن کے ساتھ آتی ہے، اور وصول کرنے والا اینٹینا بھی عمودی ہونا چاہیے؛ لٹا دیا جائے تو یہ تقریباً کچھ نہیں سنتا، جیسے اوپر نیچے ہلائی گئی رسی کی لہر ایک افقی جھری سے رک جاتی ہے۔ دوسری ریڈی ایشن پیٹرن (*radiation pattern*) ہے۔ عمودی اینٹینا افق کی طرف سب سے زیادہ حساس ہوتا ہے اور اپنے محور کے ساتھ بالکل نہیں، اس لیے تین جہتوں میں اس کی حساسیت کی شکل ایک گول ڈونٹ جیسی ہے جس کے سوراخ میں سے اینٹینا گزرتا ہے۔ لہذا ریسپور معمول کے مطابق 300 km دور کے طیارے بغیر

دقت کے سنتے ہیں اور بالکل سر کے اوپر سے گزرتے طیارے کو چند سیکنڈ کے لیے کھو دیتے ہیں، جو کسی بھی لائیو نقشے پر دیکھنے کے لائق چیز ہے۔ کئی گمک والے عناصر کو ایک دوسرے کے اوپر لگانا ڈونٹ کو چپٹا کر دیتا ہے، حساسیت کو افق کی طرف مرتکز کرتا ہے جہاں دور کے طیارے ہیں، سر کے اوپر کی قیمت پر؛ اینٹینا کے **گین (gain)** کا یہی مطلب ہے، اور یہ ہمیشہ حساسیت کی دوبارہ تقسیم ہے، کبھی اس کی تخلیق نہیں۔

تیسری اس بارے میں ہے کہ اینٹینا اور ریسیور کے درمیان کیا ہے۔ اینٹینا صرف 1090 MHz نہیں بلکہ آس پاس کا ہر سگنل پکڑتا ہے، بشمول چند سو میگاہرٹز دور کی موبائل فون کی ٹرانسمیشنیں جو کہیں زیادہ طاقتور ہیں، اس لیے سب سے پہلے ایک فلٹر لگایا جاتا ہے جو صرف ہوابازی کا بینڈ گزرنے دیتا ہے۔ پھر سگنل کو ایک کیبل سے نیچے آتا ہے، اور 1090 MHz پر کوائیکسیل کیبل ہر دس میٹر پر تقریباً آدھا سگنل کھو دیتی ہے؛ علاج یہ ہے کہ کیبل سے پہلے، اینٹینا پر، ایک لو نوائز ایمپلیفائر (low-noise amplifier) لگایا جائے، تاکہ سگنل سفر سے بچنے کے لیے کافی مضبوط ہو، نہ کہ ریسیور پر، جہاں بڑھانے سے سگنل کے بچے کھچے حصے کے ساتھ کیبل کا شور بھی بڑھ جاتا۔ یہ تفصیلات ہیں، لیکن یہی وہ تفصیلات ہیں جو طے کرتی ہیں کہ اسکول کی چھت پر لگا ریسیور افق تک کے طیارے سننے گا یا صرف قریب والے۔

باب 9

وصول کرنا اور ڈی کوڈ کرنا

اینٹینا اور نقشے پر ایک نقطے کے درمیان پانچ مراحل کی ایک زنجیر ہے۔ اینٹینا گزرتی لہر کو چند مائیکرو وولٹ کے متبادل کرنٹ میں بدلتا ہے۔ ایک فلٹر اور ایک لو نوائز ایمپلیفائر 1090 MHz بینڈ رکھتے ہیں، باقی سب رد کرتے ہیں، اور سگنل کو ہزار گنا بڑھاتے ہیں۔ ایک سافٹ ویئر ڈیفائنڈ ریڈیو فریکوئنسی پر ٹیون ہوتا ہے اور سگنل کے سیکنڈ میں بیس لاکھ نمونے (samples) لیتا ہے، اسے اعداد کے ایک سلسلے میں بدلتے ہوئے۔ ایک ڈی کوڈر اس سلسلے میں پری ایمبل کا نمونہ ڈھونڈتا ہے، 112 بٹ پڑھتا ہے، پیریٹی جانچتا ہے اور فیلڈز ڈی کوڈ کرتا ہے۔ اور ایک ٹریکر ہر طیارے کے پیغامات کو ایک واحد، مسلسل تازہ ہونے والے ریکارڈ میں جمع کرتا ہے: ایک مقام، ایک ٹریک، ایک لیبل۔

قابل ذکر مرحلہ تیسرا ہے۔ تقریباً 2010 تک 1090 MHz ڈی کوڈ کرنے کے لیے ہزاروں یورو کے خاص ہارڈ ویئر کی ضرورت تھی۔ پھر شوقین افراد نے دریافت کیا کہ 20 یورو کے USB ٹیلی ویژن ٹیونر میں ایک ایسی چپ ہے جسے کسی بھی فریکوئنسی پر ٹیون ہونے اور خام سگنل کمپیوٹر کو دینے کا حکم دیا جا سکتا ہے۔ یہ **سافٹ ویئر ڈیفائنڈ ریڈیو (software-defined radio)** ریڈیو کے مسئلے کو پروگرامنگ کے مسئلے میں بدل دیتا ہے: ایک لیپ ٹاپ یا Raspberry Pi سیکنڈ میں بیس لاکھ اعداد کا سلسلہ وصول کرتا ہے جو سگنل کی طاقت بیان کرتے ہیں، اور مفت سافٹ ویئر پری ایمبل کا نمونہ ڈھونڈتا ہے، ناپتا ہے کہ ہر مائیکرو سیکنڈ خانے کا کون سا حصہ زیادہ بلند ہے، 112 بٹ جوڑتا ہے، CRC نکالتا ہے، اور فیلڈز پرنٹ کرتا ہے۔ سیکنڈری کٹ کا ریسیور پروجیکٹ بالکل یہی زنجیر ہے، اور ایک اسکول اسے 100 یورو سے کم میں بنا سکتا ہے۔

ٹریکر کا مرحلہ وہ ہے جہاں پیغامات کا سلسلہ علم بن جاتا ہے۔ یاد رکھیں، مقام کا ایک اکیلا پیغام اس وقت تک مبہم ہے جب تک ایک جفت اور ایک طاق پیغام کا جوڑا نہ بن جائے۔ رفتار مقام سے الگ آتی ہے، کال سائن پھر الگ، اور ٹریکر انہیں ICAO ایڈریس کے ذریعے جوڑتا ہے، غلطی کی جانچ میں ناکام ہونے والی ہر چیز رد کرتا ہے، اور ہر طیارے کی آخری معلوم حالت رکھتا ہے۔ اگر ایک منٹ تک کوئی پیغام نہ آئے، عموماً اس لیے کہ طیارہ افق کے نیچے چلا گیا ہے، تو ٹریک ختم ہو جاتا ہے۔

باب 10

ایک ریسیور سے ایک براعظم کے نقشے تک

ایک ریسیور آسمان کا چند سو کلومیٹر چوڑا دائرہ سنتا ہے۔ یورپ کے نقشے کو ایسے سینکڑوں درکار ہیں، اور کارآمد ریسیور شہروں میں نہیں بلکہ پھیلے ہوئے ہوتے ہیں: ساحلوں پر، وادیوں میں، جزیروں پر، جہاں بھی کسی دوسرے ریسیور کا دائرہ نہیں پہنچتا۔ ہر ریسیور اپنے ڈی کوڈ کیے ہوئے پیغامات، ہر ایک پر آمد کا وقت درج کر کے، انٹرنیٹ کے ذریعے ایک مرکزی سروس کو بھیجتا ہے۔ وہ سروس

یکجا کرتی ہے: ایک اونچے طیارے کا ایک ہی پیغام عموماً دس یا بیس ریسوریوں سے ایک ساتھ پہنچتا ہے، اور نقول کو پہچان کر ضم کرنا ہوتا ہے۔ وہ جانچتی بھی ہے: جو مقام اسی طیارے کے بارے میں ہر پڑوسی ریسوری کی رائے سے اختلاف کرے وہ غالباً ڈی کوڈنگ کی غلطی یا خراب ٹرانسپونڈر ہے، اور اسے نشان زد یا خارج کر دیا جاتا ہے۔

ملٹی لیٹریشن: ان طیاروں کو ڈھونڈنا جو نہیں بتاتے کہ وہ کہاں ہیں

ہر طیارہ مقام نشر نہیں کرتا۔ پرانے ٹرانسپونڈر ریڈار کو شناخت اور بلندی سے جواب دیتے ہیں لیکن ان میں سیٹلائٹ کی معلومات نہیں ہوتیں؛ کچھ طیارے جان بوجھ کر کچھ نہیں بھیجتے۔ پھر بھی ان کی 1090 MHz ٹرانسمیشنیں زمین تک پہنچتی ہیں، اور ایک نیٹ ورک سیٹلائٹ نیویگیشن کو الٹا کر کے انہیں ڈھونڈ سکتا ہے۔ اگر بالکل ہم آہنگ گھڑیوں والے چار ریسوری ہر ایک وہ لمحہ ریکارڈ کریں جب ایک ہی ٹرانسمیشن پہنچی، تو ان لمحوں کے فرق فاصلوں کے فرق ظاہر کرتے ہیں: جو پیغام ریسوری A تک ریسوری B سے ایک مائیکرو سیکنڈ پہلے پہنچا وہ ایسے نقطے سے بھیجا گیا جو B کی نسبت A سے 300 m زیادہ قریب ہے۔ اس خاصیت والے تمام نقطے A اور B کے درمیان ایک خمیدہ سطح، ایک ہائپر بولائیڈ (hyperboloid)، پر واقع ہیں۔ چار ریسوریوں سے تین ایسی سطحیں طیارے پر ملتی ہیں۔ یہ **ملٹی لیٹریشن (multilateration)** ہے، اور اسے سینکڑوں کلومیٹر دور ریسوریوں کے درمیان تقریباً دسویں مائیکرو سیکنڈ، 30 m، کی ٹائمنگ درکار ہے، جو ریسوری انہی سیٹلائٹس سے حاصل کرتے ہیں جو طیارہ استعمال کرتا ہے۔

ایک ہی خیال، دو بار

سیٹلائٹ نیویگیشن: ایک ریسوری، چار ٹرانسمیٹر جن کے مقام معلوم ہیں، ریسوری کے لیے حل کریں۔ ملٹی لیٹریشن: ایک ٹرانسمیٹر، چار ریسوری جن کے مقام معلوم ہیں، ٹرانسمیٹر کے لیے حل کریں۔ دونوں میں جو چیز واقعی ناپی جاتی ہے وہ وقت ہے، اور 1 مائیکرو سیکنڈ 300 میٹر ہے۔

باب 11

یہ کس کام آتا ہے، اور کہاں کم پڑتا ہے

ایئر ٹریفک کنٹرول پہلا گاہک ہے۔ پورے یورپ میں کنٹرولر اب ایک ملی جلی تصویر دیکھتے ہیں جس میں ADS-B، اپنی سیکنڈ میں دو بار کی تازہ کاری اور سیٹلائٹ درجے کی درستگی کے ساتھ، ریڈار اور ملٹی لیٹریشن کے ساتھ ملایا جاتا ہے؛ جہاں ریڈار کبھی نہیں پہنچا، شمالی بحر اوقیانوس، آرکٹک، صحارا اور بیشتر سمندروں پر، ADS-B پیغامات نچلے مدار کے مواصلاتی سیٹلائٹس پر نصب ریسوری پکڑتے ہیں، جس سے بحر اوقیانوس عبور کرنے والے طیاروں کو پہلے سے کہیں زیادہ قریب رکھنا ممکن ہوا ہے۔ طیارے دوسرے گاہک ہیں: "ADS-B In" والا مسافر طیارہ اپنے عملے کو قریبی ٹریفک دکھاتا ہے اور اسے تصادم سے بچاؤ کے نظام میں دیتا ہے۔ ایئرپورٹ اسے دھند میں زمین پر طیاروں اور گاڑیوں کا پیچھا کرنے کے لیے استعمال کرتے ہیں۔ محققین کھلے ڈیٹا کو شور، ایندھن کے استعمال، کنٹرولز اور تاخیر کے مطالعے کے لیے استعمال کرتے ہیں۔ اور اسکول کی چھت پر ایک ریسوری، چھوٹے پیمانے پر، اس سب میں شریک ہے۔

نظام کی کمزوریاں براہ راست اس کے ڈیزائن سے نکلتی ہیں، اور ہر ایک کو محض گنوانے کے بجائے سمجھنا فائدہ مند ہے۔ چونکہ پیغامات کھلے عام نشر ہوتے ہیں، نہ خفیہ کیے ہوئے نہ دستخط شدہ، پیغام میں خود کوئی ایسی چیز نہیں جو ثابت کرے کہ یہ کسی طیارے سے آیا ہے۔ زمین پر ایک ٹرانسمیٹر، غیر قانونی طور پر، ایک بالکل درست ساخت کا پیغام نشر کر سکتا ہے جو ایک ایسے طیارے کو بیان کرے جو موجود ہی نہیں، اور ریسوری اسے بغیر کسی اعتراض کے ڈی کوڈ کر لے گا۔ جو چیز نظام کی حفاظت کرتی ہے وہ پیغام نہیں بلکہ اس کے گرد کا سیاق ہے: ایک بھوت ریڈار پر نظر نہیں آئے گا، ملٹی لیٹریشن سے نہیں ملے گا، اور حقیقی ٹریفک کی طرح برتاؤ نہیں کرے گا، اور کنٹرول سینٹر مسلسل جانچ کرتے رہتے ہیں۔ پروٹوکول کے ایک ایسے ورژن پر جس میں خفیہ نگاری کے دستخط ہوں کئی سال سے بات ہو رہی ہے؛ رکاوٹ تکنیکی سے زیادہ عملی ہے، کیونکہ دنیا کے ہر ٹرانسپونڈر کو بدلنا پڑے گا۔

چونکہ مقام طیارے کے سیٹلائٹ ریسور پر منحصر ہے، جو چیز بھی سیٹلائٹ نیویگیشن میں خلل ڈالے وہ ADS-B میں خلل ڈالتی ہے۔ سیٹلائٹ سگنلز کی جیمنگ اور سپوفنگ تنازع والے علاقوں کے قریب عام ہو گئی ہے، اور ایسے علاقے سے گزرتا طیارہ ہو سکتا ہے مقام معلوم ہی نہ کر سکے، یا غلط معلوم کرے۔ تب اس کے پیغامات ایک گھٹا ہوا سالمیت زمرہ لے جاتے ہیں، کنٹرولر کا نظام انہیں نشان زد کرتا ہے، اور ریڈار، وہ آزاد پیمائش جسے ADS-B کہی پوری طرح بدلنے کے لیے بنا ہی نہیں تھا، ذمہ داری سنبھال لیتا ہے۔ لہذا دونوں کا رشتہ جانشین اور پیشرو کا نہیں بلکہ ایسے ساتھیوں کا ہے جن کی کمزوریاں ایک دوسرے کی تکمیل کرتی ہیں۔

چونکہ لازمی قانون مسافر طیاروں اور بیشتر بڑے طیاروں پر لاگو ہے لیکن ہر اڑنے والی چیز پر نہیں، نقشہ ڈیزائن ہی سے نامکمل ہے۔ کنٹرولڈ فضائی حدود سے باہر ہلکے طیارے، گلائڈر، غبارے اور بہت سے فوجی طیارے شاید ADS-B بالکل نہ رکھتے ہوں، اور کچھ ہلکے طیارے ایسے دوسرے نظام استعمال کرتے ہیں جو 1090 MHz ریسور نہیں سنتا۔ اور چونکہ نشریات طیارے کی شناخت کرتی ہیں، یہ اس کے مالک کی شناخت بھی کر سکتی ہیں: ایک خاص نجی جیٹ کا پیچھا کرنا دراصل ایک خاص شخص کا پیچھا کرنا ہے، جس سے ایسے پروگرام بنے ہیں جو درخواست پر طیاروں کی رجسٹریشن چھپاتے ہیں، اور ایک جاری بحث کہ کیا وہ معلومات جو طیارہ دنیا کو نشر کرتا ہے نجی بھی ہو سکتی ہیں۔ یہ بحث بڑے طلبہ کے سامنے رکھنے کے لیے اچھی ہے، کیونکہ طبیعیات اس کا کوئی جواب نہیں دیتی۔

باب 12

ایک مختصر تاریخ

1935 سے 1945

برطانیہ، جرمنی اور امریکہ میں پرائمری ریڈار تیار ہوا؛ جنگ کے اختتام تک "دوست یا دشمن کی شناخت" والے ٹرانسپونڈر ریڈار کے پلسوں کا کوڈ شدہ جواب دیتے ہیں، جو سیکنڈری ریڈار کا جدِ امجد ہے۔

1950 سے 1960 کی دہائی

شہری سیکنڈری ریڈار معیاری بنا: 1030 MHz پر استفسار، 1090 MHz پر جواب، Mode A شناختی کوڈ اور Mode C بلندی۔

1980 کی دہائی

Mode S، منفرد 24 بٹ ایڈریس اور ڈیٹا پیغامات کے ساتھ، MIT لنکن لیبارٹری میں تیار ہوا اور ICAO نے اپنایا۔ GPS شہری صارفین کے لیے فعال ہوا۔

1990 سے 2000 کی دہائی

ADS-B کی تعریف اور آزمائش ہوئی، خاص طور پر الاسکا میں، جہاں ریڈار کوریج ناممکن اور حادثات عام تھے۔ 1090 MHz ایکسٹینڈڈ سکوائر بین الاقوامی طور پر معیاری بنا۔

2010 کی دہائی

سسٹم سافٹ ویئر ڈیفائنڈ ریڈیو نے وصولی کو ایک مشغلہ بنا دیا؛ ہزاروں ریسوروں کے رضاکار نیٹ ورک ابھرے۔ سمندری کوریج کے لیے سیٹلائٹس پر ریسور بھیجے گئے۔

2020

امریکہ (جنوری) اور یورپی یونین (جون، سال کے آخر تک منتقلی کے ساتھ) کی کنٹرولڈ فضائی حدود میں بیشتر طیاروں کے لیے ADS-B لازمی ہو گیا۔ آسمان بولنے لگتا ہے، ہر جگہ، ہر وقت۔

فرہنگ

ADS-B

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (خودکار منحصراً نگرانی - نشریات). طیارے اپنا مقام خود نشر کرتے ہیں۔

بیرومیٹرک بلندی

ہوا کے دباؤ سے، ایک معیاری فضا کے ذریعے، اخذ کی گئی بلندی؛ جو طیارے رپورٹ کرتے ہیں۔

CPR

کمپیکٹ پوزیشن رپورٹنگ، جفت/طاق طریقہ جو ایک درست مقام کو 34 بٹ میں سموتا ہے۔

CRC

سائیکلک ریڈنڈنسی چیک، 24 بٹ کی غلطی کی جانچ جس پر ہر پیغام ختم ہوتا ہے۔

ایکسٹینڈڈ سکوئٹر

112 بٹ کی خود بخود بھیجی جانے والی Mode S ٹرانسمیشن جو ADS-B لے جاتی ہے۔

GNSS

عالمی نیویگیشن سیٹلائٹ نظام: GPS، Galileo، GLONASS، BeiDou۔

ICAO ایڈریس

طیارے کے ٹرانسپونڈر کی مستقل 24 بٹ شناخت۔

Mode S

انتخابی سیکنڈری ریڈار معیار جس پر ADS-B بنا ہے۔

آگے

نظریے سے عمل تک: ریسور بنائیں

بارہ ابواب نے ایک ایسا نظام سمجھایا جسے اب آپ اپنے ہاتھ میں تھام سکتے ہیں۔ عملی ورکشاپ انہیں ایک دوپہر کے کام میں بدل دیتی ہے: 100 سے 150 یورو میں کیا خریدنا ہے، اینٹینا کیسے بنانا اور کہاں لگانا ہے، Raspberry Pi کیسے تیار کرنا اور Dataero فیڈر کیسے انسٹال کرنا ہے، اور جو طیارے آپ سنتے ہیں انہیں لائیو نقشے پر، آپ کے اسٹیشن کے نام کے ساتھ، ابھرتا کیسے دیکھنا ہے۔ اوپر کے ہر باب کی ایک پیمائش وہاں اس کی منتظر ہے: حقیقی طیاروں کے مقابل ریڈیو افق، سگنل کے کالم میں معکوس مربع قانون، آسمان کی روزانہ کی تال۔

عملی ورکشاپ کھولیں <https://radar.dataero.eu/ur/learning/workshop>

ملٹی لیٹریشن

کئی ریسوروں پر سگنل کی آمد کے وقت کے فرق سے ٹرانسمیٹر کا مقام معلوم کرنا۔

پاتھ لاس

فاصلے کے ساتھ سگنل کا کمزور ہونا، معکوس مربع قانون کے مطابق۔

ریڈیو افق

سب سے دور کا وہ فاصلہ جہاں اینٹینا اور طیارے کے درمیان سیدھی لکیر زمین سے نہیں ٹکراتی۔

SDR

سافٹ ویئر ڈیفائنڈ ریڈیو: ایک ٹیونر جو خام سگنل کے نمونے ڈی کوڈنگ کے لیے کمپیوٹر کو دیتا ہے۔

SSR

سیکنڈری سرویلنس ریڈار: زمین استفسار کرتی ہے، ٹرانسپونڈر جواب دیتا ہے۔

ٹرانسپونڈر

طیارے کا وہ ریڈیو جو ریڈار کو جواب دیتا ہے اور 1090 MHz پر ADS-B نشر کرتا ہے۔

طول موج

لہر کی دو لگاتار چوٹیوں کے درمیان فاصلہ: 1090 MHz، c / f پر 27.5 cm۔