

রেফারেন্স কোর্স - যেকোনো বয়স্ক পাঠকের জন্য

ADS-B কী এবং কীভাবে কাজ করে

বারোটি অধ্যায়। বিমান চলাচল বা বেতার সম্পর্কে আগে থেকে কিছু জানা থাকার দরকার নেই; সমাধান করা উদাহরণগুলোর জন্য মাধ্যমিক স্কুলের গণিতই যথেষ্ট, আর সেগুলো বাদ দিলেও মূল সূত্র হারায় না। পড়তে প্রায় 50 মিনিট।

শিখুন - <https://radar.dataero.eu/bn/learning/course> 2026-10-22

সূচিপত্র

অধ্যায় 1 সমস্যা: বিমানে ভরা এক আকাশ, যা কেউ দেখতে পায় না

অধ্যায় 2 ADS-B-এর আগে: রাডার দিয়ে বিমান খোঁজা

অধ্যায় 3 ধারণাটি: বিমানই আমাদের বলুক

অধ্যায় 4 বিমান কীভাবে জানে সে কোথায় আছে

অধ্যায় 5 একটি বার্তার গঠন

অধ্যায় 6 - পদার্থবিজ্ঞান তরঙ্গ: অদৃশ্য আলো হিসেবে বেতার

অধ্যায় 7 - পদার্থবিজ্ঞান পাল্লা: পৃথিবীর বাঁক ও সংকেতের ক্ষীণ হওয়া

অধ্যায় 8 - পদার্থবিজ্ঞান অ্যান্টেনা: 27 সেন্টিমিটারের একটি তরঙ্গ ধরা

অধ্যায় 9 গ্রহণ ও ডিকোড করা

অধ্যায় 10 একটি রিসিভার থেকে একটি মহাদেশের মানচিত্র

অধ্যায় 11 এটি কী কাজে লাগে, আর কোথায় কম পড়ে

অধ্যায় 12 একটি সংক্ষিপ্ত ইতিহাস

শব্দকোষ

এরপর তত্ত্ব থেকে অনুশীলন: রিসিভারটি বানান

অধ্যায় 1

সমস্যা: বিমানে ভরা এক আকাশ, যা কেউ দেখতে পায় না

একটি সাধারণ কর্মদিবসে প্রায় 30 000 ফ্লাইট ইউরোপের আকাশসীমা পার হয়। ক্রুজে থাকা একটি যাত্রীবাহী বিমান চলে সেকেন্ডে মোটামুটি 250 মিটার, অর্থাৎ 900 km/h গতিতে; মুখোমুখি আসা দুটি বিমান প্রতি সেকেন্ডে আধা কিলোমিটার করে কাছে আসে। জানালা দিয়ে তাকিয়ে একজন পাইলট এর প্রায় কিছুই দেখেন না: 10 000 মিটার উঁচুতে অন্য বিমানগুলো বিন্দুর মতো, আর মেঘ তো বেশিরভাগকে ঢেকেই রাখে। আকাশ হলো একটি ত্রিমাত্রিক সড়ক-জাল, যার কোনো রাস্তা আঁকা নেই, আর তার উপরের যানবাহন একই সঙ্গে দ্রুত ও অদৃশ্য।

এই যানবাহনকে পরস্পর থেকে দূরে রাখার জন্যই এয়ার ট্রাফিক কন্ট্রোল (air traffic control) আছে। নীতিগতভাবে নিয়মগুলো সরল: নিয়ন্ত্রিত আকাশসীমায় বিমানগুলোকে উল্লম্বভাবে অন্তত 1 000 ফুট (প্রায় 300 মিটার) দূরে রাখা হয়, অথবা অনুভূমিকভাবে একটি নির্দিষ্ট দূরত্বে, রাডার কভারেজের কাছে সাধারণত 5 নটিক্যাল মাইল (9.3 km) এবং মহাসাগরের উপরে তার চেয়ে অনেক বেশি। নিয়ম প্রয়োগ করতে হলে একজন কন্ট্রোলারকে তাঁর সেক্টরের প্রতিটি বিমানের অবস্থান অবিরাম ও নির্ভরযোগ্যভাবে জানতে হয়: এক মিনিট আগে সে কোথায় ছিল তা নয়, বরং এখন সে কোথায়, কত উঁচুতে, আর কোন দিকে যাচ্ছে। এই জ্ঞান কীভাবে পাওয়া যায়, সেটিই এই পুরো কোর্সের বিষয়। এর কারিগরি নাম **নজরদারি (surveillance)**।

মনে রাখার মতো একটি সংখ্যা

900 km/h গতিতে একটি বিমান এক মিনিটে 15 km আর এক সেকেন্ডে 250 m যায়। যে নজরদারি পদ্ধতি ধীরে হালনাগাদ হয়, বা যার ত্রুটি বড়, সেটি ঠিক যে দূরত্বগুলো গুরুত্বপূর্ণ সেখানেই কন্ট্রোলারকে অনুমানের উপর ছেড়ে দেয়।

অধ্যায় 2

ADS-B-এর আগে: রাডার দিয়ে বিমান খোঁজা

প্রথম উত্তরটি, যা 1930-এর দশকের শেষে তৈরি হয় ও দ্বিতীয় বিশ্বযুদ্ধের সময় পরিণত হয়, তা হলো **প্রাথমিক রাডার (primary radar)**। একটি বড় ঘূর্ণায়মান অ্যান্টেনা বেতার শক্তির একটি ছোট, অত্যন্ত শক্তিশালী পালস পাঠায়। পালসটি কোনো বিমানে আঘাত করলে তার ক্ষুদ্র একটি ভগ্নাংশ ফিরে আসে। রাডার পালস ছেড়ে যাওয়া ও প্রতিধ্বনি ফিরে আসার মধ্যের সময় মাপে; বেতার যেহেতু আলোর গতিতে, 300 000 km/s বেগে চলে, সময় থেকে দূরত্ব পাওয়া যায়। অ্যান্টেনা কোন দিকে তাক করা ছিল, তা থেকে পাওয়া যায় দিক। প্রাথমিক রাডার চমৎকারভাবে স্বাধীন: বিমানে কোনো যন্ত্রই লাগে না, এ কারণেই সামরিক বাহিনী এখনো এটি ব্যবহার করে। কিন্তু এর কিছু সত্যিকারের দুর্বলতা আছে। দূরের বিমান থেকে ফেরা প্রতিধ্বনি অসম্ভব ক্ষীণ, তাই ট্রান্সমিটারকে বিশাল হতে হয়। প্রতিধ্বনি বলে না বিমানটি কে, বা কত উঁচুতে। আর অ্যান্টেনার একবার ঘুরে আসতে কয়েক সেকেন্ড লাগে, তাই প্রতিটি বিমানকে কেবল প্রতি 4 থেকে 12 সেকেন্ডে একবার দেখা যায়, যার মধ্যে সে 3 km পর্যন্ত সরে গেছে।

দ্বিতীয় উত্তর, **সেকেন্ডারি সার্ভেইল্যান্স রাডার (secondary surveillance radar)**, সংক্ষেপে SSR, বিমানটিকে একজন অংশগ্রহণকারীতে পরিণত করল। একটি ভূমি স্টেশন 1030 MHz-এ একটি প্রশ্ন, একটি **জিজ্ঞাসা (interrogation)**, পাঠায়। বিমানে থাকা একটি ছোট রেডিও, **ট্রান্সপন্ডার (transponder)**, প্রশ্নটি শোনে এবং 1090 MHz-এ নিজের শক্তিশালী সংকেত দিয়ে উত্তর দেয়। উত্তরটি প্রতিফলিত নয়, সম্প্রচারিত, তাই এটি রাডারের প্রতিধ্বনির চেয়ে লক্ষ লক্ষ গুণ শক্তিশালী; আর যেহেতু এটি কম্পিউটারে তৈরি, এটি তথ্য বহন করতে পারে। সবচেয়ে পুরোনো রূপে (Mode A) উত্তরে থাকে কন্ট্রোলারের দেওয়া চার অঙ্কের একটি পরিচয় কোড; Mode C-তে তার সঙ্গে থাকে বিমানের উচ্চতাও। 1980-এর দশকে এল **Mode S** ("S" মানে selective, বাছাইযোগ্য), যেখানে প্রতিটি ট্রান্সপন্ডারের একটি অনন্য 24-বিট ঠিকানা আছে, তাকে আলাদাভাবে জিজ্ঞাসা করা যায়, আর সে 56 বা 112 বিটের তথ্য-বার্তা দিয়ে উত্তর দিতে পারে। এই সংখ্যাটি, 1090 MHz, আর এই শব্দটি, Mode S, মনে রাখুন: ADS-B সরাসরি এ দুটির উপরেই গড়া।

সেকেন্ডারি রাডার ছিল বড় এক উন্নতি, তবু এর পূর্বসূরির দুটি সীমাবদ্ধতা এতেও রয়ে গেল। বিমান শুধু জিজ্ঞাসা করলেই কথা বলে, তাই মাটিতে এখনো সীমার মধ্যে একটি জিজ্ঞাসাকারী স্টেশন লাগে, যা মহাসাগর, মরুভূমি ও পর্বতমালাকে বাদ দিয়ে দেয়। আর উত্তরটি কোন দিক থেকে এল তা জানতে স্টেশনের এখনো একটি ঘূর্ণায়মান অ্যান্টেনা লাগে, তাই প্রতিটি বিমানকে এখনো প্রতি ঘূর্ণনে একবারই দেখা যায়, আর কন্ট্রোলারের পর্দায় এখনো মসৃণভাবে চলা বিমানের বদলে এমন একটি বিন্দু দেখা যায় যা কয়েক সেকেন্ড পরপর লাফ দেয়। এর চেয়ে ভালো করতে হলে মৌলিকভাবে ভিন্ন কিছু দরকার ছিল: বিমান যেন জিজ্ঞাসা ছাড়াই নিজের অবস্থান জানায়, আর মাটিকে যেন কিছুই মাপতে না হয়।

অধ্যায় 3

ধারণাটি: বিমানই আমাদের বলুক

1990-এর দশকের মধ্যে দুটি প্রযুক্তি পরিণত হয়ে উঠেছিল, যা একটি ভিন্ন পথ সম্ভব করল। উপগ্রহ নেভিগেশন উপযুক্ত যন্ত্রসজ্জিত প্রতিটি বিমানকে নিজের অবস্থানের নিখুঁত জ্ঞান দিল, মাটি থেকে কোনো রাডার যা মাপতে পারত তার চেয়ে অনেক ভালো। আর Mode S ট্রান্সপন্ডার ইতিমধ্যেই এমন একটি রেডিও দিয়েছিল যা 1090 MHz-এ তথ্য-বার্তা পাঠাতে

পারে। দুটিকে জুড়ে দিলে যুক্তিটি অপ্রতিরোধ্য: বিমান কোথায় তা মাপতে মাটির কষ্ট করার বদলে, বিমান, যে ইতিমধ্যেই জানে, নিয়মিত বিরতিতে সবাইকে কেবল বলে দিক। সেটিই ADS-B, আর এর নামের চারটি শব্দ একটি নিখুঁত বর্ণনা।

এটি **স্বয়ংক্রিয় (automatic)**: কোনো কিছু সম্প্রচার শুরু করায় না। ট্রান্সপন্ডার নিজের সময়সূচিতে পাঠায়, প্রতি সেকেন্ডে প্রায় দুবার, সীমার মধ্যে কোনো ভূমি স্টেশন থাকুক বা না থাকুক, পাইলট কিছু করুন বা না করুন; আসলে ট্রান্সপন্ডার বন্ধ না করে পাইলট উড্ডয়নের সময় এটি থামাতেও পারেন না, আর তা করা নিষিদ্ধ। এটি **নির্ভরশীল (dependent)**: বার্তার প্রতিটি উপাদান আসে বিমানের নিজের যন্ত্র থেকে, অবস্থান তার উপগ্রহ রিসিভার থেকে ও উচ্চতা তার চাপ-অল্টিমিটার থেকে, আর মাটি কিছুই মাপে না; যা বলা হয় তা-ই বিশ্বাস করে। এটি **নজরদারি (surveillance)**: এর উদ্দেশ্য অন্যদের জানানো বিমানটি কোথায়, এয়ার ট্রাফিক কন্ট্রোল ও কাছের বিমানগুলোর জন্য; এটি নেভিগেশন থেকে আলাদা, যা হলো বিমানের নিজে নিজের অবস্থান জানা, আর যোগাযোগ থেকেও আলাদা, যা হলো পাইলটের সঙ্গে কথা বলা। আর এটি একটি **সম্প্রচার (broadcast)**: বার্তার কোনো প্রাপক নেই, কোনো প্রাপ্তিস্বীকার নেই, কোনো এনক্রিপশন নেই, আর সীমার মধ্যে রিসিভার থাকা যে কেউ হুবহু একই জিনিস শোনে, সে কন্ট্রোল সেন্টার হোক, অন্য একটি যাত্রীবাহী বিমান হোক, বা একটি স্কুল।

"নির্ভরশীল" শব্দটিই প্রকৌশলীদের দুর্শ্চিন্তায় ফেলে, আর এটিই ব্যাখ্যা করার সবচেয়ে বেশি দাবি রাখে। রাডার একটি স্বাধীন পরিমাপ করে: বিমানের যন্ত্র ভুল হলেও রাডারের কিছু যায় আসে না। ADS-B বিমানের নিজস্ব নেভিগেশন ব্যবস্থার প্রতিটি ত্রুটি উত্তরাধিকার হিসেবে পায়, আর সেই ব্যবস্থা প্রতারণিত হলে বা বিকল হলে সম্প্রচারিত অবস্থান একই আত্মবিশ্বাসে ভুল হয়। এ কারণেই প্রতিটি ADS-B বার্তা অবস্থানের পাশাপাশি বহন করে একটি বিবৃতি, বিমান নিজের অবস্থানকে কতটা বিশ্বাস করে (অখণ্ডতা ও নির্ভুলতার শ্রেণি, যা আমরা অধ্যায় 5-এ দেখব), আর এ কারণেই রাডার বন্ধ করে দেওয়া হয়নি।

"সম্প্রচার" শব্দটিই এই কোর্সকে সম্ভব করে। বার্তাগুলো যেহেতু খোলাখুলি সবাইকে পাঠানো হয়, সেগুলো শুধু এয়ার ট্রাফিক কন্ট্রোল নয়, 1090 MHz-এ টিউন করা যেকোনো রিসিভারই শোনে, যার মধ্যে আছে সেটিও যা আপনি হয়তো স্কুলের ছাদে বসাবেন। একই বৈশিষ্ট্য ব্যবস্থাটির প্রধান সীমাবদ্ধতারও উৎস, যা অধ্যায় 11-এ আলোচিত: যে বার্তা যে কেউ পড়তে পারে, সে বার্তা যে কেউ জালও করতে পারে।

অধ্যায় 4

বিমান কীভাবে জানে সে কোথায় আছে

ADS-B-এর সবকিছু দাঁড়িয়ে আছে বিমানের নিজের অবস্থান জানার উপর, তাই এই অধ্যায়টি উপগ্রহ নেভিগেশন নিয়ে। সাধারণ নাম **GNSS**, Global Navigation Satellite System; আমেরিকার GPS সবচেয়ে পরিচিত, আর ইউরোপের Galileo, রাশিয়ার GLONASS ও চীনের BeiDou একই নীতিতে কাজ করে। প্রতিটি ব্যবস্থা প্রায় 24 থেকে 30টি উপগ্রহের একটি বহর, যা বিমানের অনেক উপরে, মোটামুটি 20 000 km উচ্চতায় প্রদক্ষিণ করে, আর প্রতিটিতে আছে একটি পারমাণবিক ঘড়ি, যা এক সেকেন্ডের কয়েক বিলিয়ন ভাগের এক ভাগ পর্যন্ত নির্ভুল। প্রতিটি উপগ্রহ অবিরাম একটি বেতার সংকেত পাঠায়, যা কার্যত বলে: "আমি উপগ্রহ নম্বর N, আমার অবস্থান এই, আর ঠিক T সময়ে আমি এটি পাঠিয়েছি।"

বিমানের রিসিভার সেই সংকেত একটু পরে শোনে, কারণ বেতারের পথ পাড়ি দিতে সময় লাগে: 300 000 km/s বেগে উপগ্রহ থেকে 20 000 km আসতে লাগে এক সেকেন্ডের প্রায় 67 হাজার ভাগের এক ভাগ। রিসিভার বার্তায় লেখা সময়ের সঙ্গে পৌঁছানোর সময় তুলনা করে। পার্থক্যকে আলোর গতি দিয়ে গুণ করলে পাওয়া যায় সেই উপগ্রহের দূরত্ব। একটি দূরত্ব রিসিভারকে বসায় সেই উপগ্রহকে ঘিরে একটি গোলকের উপর কোথাও। দুটি গোলক ছেদ করে একটি বৃত্ত; তিনটি গোলক দুটি বিন্দুতে, যার একটি সাধারণত অবাস্তব (মাটির গভীরে বা মহাকাশে বহু দূরে) এবং বাদ দেওয়া হয়। তাই তিনটি উপগ্রহই যথেষ্ট হতো, যদি রিসিভারের একটি নিখুঁত ঘড়ি থাকত।

তা নেই। একটি পারমাণবিক ঘড়ির দাম হাজার হাজার ইউরো আর তা জায়গায় আঁটবেও না; রিসিভারে আছে একটি সস্তা কোয়ার্টজ ঘড়ি, যা প্রয়োজনীয় সময়-নির্ভুলতার চেয়ে অনেক বেশি ভুল হতে পারে। এখানেই চমৎকার অংশটি। রিসিভার নিজের ঘড়ির ক্রটিকে তার তিনটি অবস্থান-স্থানাঙ্কের পাশে চতুর্থ অজানা রাশি হিসেবে ধরে এবং চতুর্থ একটি উপগ্রহ শোনে। চারটি সমীকরণ, চারটি অজানা: রিসিভার নিজের অবস্থান বের করে, আর উপজাত হিসেবে নিজের ঘড়িকে কয়েক দশ ন্যানোসেকেন্ডের মধ্যে শুধরে নেয়। এ কারণেই একটি উপগ্রহ রিসিভারের দৃষ্টিসীমায় অন্তত চারটি উপগ্রহ লাগে, আর এ কারণেই প্রতিটি GNSS রিসিভার প্রসঙ্গক্রমে ভবনের সবচেয়ে নির্ভুল ঘড়িগুলোর একটিও বটে।

মাত্রাগুলো নিয়ে একটু থামা উচিত, কারণ সেগুলোই ব্যাখ্যা করে কেন উপগ্রহ নেভিগেশন আসলে সময় মাপার একটি অনুশীলন, যেখানে জ্যামিতি কেবল পরে আসে। আলো এক ন্যানোসেকেন্ডে 30 সেন্টিমিটার আর এক মাইক্রোসেকেন্ডে 300 মিটার যায়, তাই এক সেকেন্ডের এক মিলিয়ন ভাগের এক ভাগের সময়-ক্রটি হয়ে যায় 300 মিটারের অবস্থান-ক্রটি, আর একটি আধুনিক রিসিভারের কয়েক মিটারের নির্ভুলতার মানে প্রায় দশ ন্যানোসেকেন্ডের স্তরে সময় মাপা। একটি বাস্তব উদাহরণ নিন। একটি উপগ্রহ একটি সংকেতে সময় লেখে 12:00:00.000 000 000; বিমানের রিসিভার সেটি শোনে 12:00:00.070 000 000-এ। যাত্রাকাল 0.070 s, তাই দূরত্ব $0.070 \times 300\,000 \text{ km/s} = 21\,000 \text{ km}$ । রিসিভারের নিজের ঘড়ি যদি মাত্র এক মাইক্রোসেকেন্ড এগিয়ে থাকত, সে হিসাব করত 21 000.3 km, 300 মিটার বেশি, আর একই ক্রটি অন্য প্রতিটি উপগ্রহের দূরত্বেও ঢুকে পড়ত। সেই সাধারণ ক্রটিটিকেই চতুর্থ উপগ্রহ ধরে ফেলে ও সরিয়ে দেয়।

দুটি উচ্চতা, একটি নয়

উপগ্রহ দেয় পৃথিবীর গাণিতিক পৃষ্ঠ থেকে উচ্চতা, একটি *জ্যামিতিক* উচ্চতা। অথচ এয়ার ট্রাফিকের কাজে বিমান যে উচ্চতা সম্প্রচার করে, তা সেটি নয়। সেটি হলো **ব্যারোমিটারের উচ্চতা (barometric altitude)**, যা বিমানের বাইরের বায়ুচাপ থেকে পাওয়া যায়, মাপা হয় ফিউজেলাজের গায়ে স্ট্যাটিক পোর্ট নামের একটি ছোট ছিদ্র দিয়ে। বায়ুচাপ উচ্চতার সঙ্গে একটি জানা নিয়মে কমে (মাটির কাছে প্রতি 8 মিটারে মোটামুটি 1 hPa, উপরে আরও ধীরে), আর পৃথিবীর প্রতিটি অল্টিমিটার একই আদর্শ বায়ুমণ্ডল ব্যবহার করে চাপকে উচ্চতায় রূপান্তর করে, যার ভিত্তি সমুদ্রপৃষ্ঠে 1013.25 hPa। অস্বাভাবিক চাপের দিনে প্রতিটি বিমানের ব্যারোমিটারের উচ্চতা একই পরিমাণে ভুল হয়, আর সেটিই আসল কথা: দূরত্ব বজায় রাখার জন্য যা গুরুত্বপূর্ণ তা সমুদ্র থেকে প্রকৃত উচ্চতা নয়, বরং এটি যে "ফ্লাইট লেভেল 350" পড়া দুটি বিমান সত্যিই "ফ্লাইট লেভেল 340" পড়া একটি বিমান থেকে 300 মিটার দূরে। ADS-B তার অবস্থান-বার্তায় ব্যারোমিটারের উচ্চতা সম্প্রচার করে, 25 ফুট (7.6 m) ধাপে, আর আলাদাভাবে সম্প্রচার করে সেটির সঙ্গে উপগ্রহ-উচ্চতার পার্থক্য, যাতে একটি রিসিভার দুটিই পুনরুদ্ধার করতে পারে।

অধ্যায় 5

একটি বার্তার গঠন

সারা বিশ্বের যাত্রীবাহী বিমান যে ADS-B বার্তা ব্যবহার করে তা হলো একটি Mode S সম্প্রচার, যার নাম **এক্সটেন্ডেড স্কুইটার (extended squitter)**; "squitter" রাডারের পুরোনো অপভাষা, যার মানে উত্তরে নয়, স্বতঃস্ফূর্তভাবে পাঠানো সম্প্রচার, আর "extended" কারণ 112 বিটে এটি মূল Mode S উত্তরের দ্বিগুণ লম্বা। প্রকৌশলীরা "1090 MHz extended squitter"-এর জন্য লেখেন "1090ES"। প্রতিটি সম্প্রচার মোট 120 মাইক্রোসেকেন্ড স্থায়ী হয়: একটি 8-মাইক্রোসেকেন্ডের *প্রিঅ্যাম্বল (preamble)*, চারটি পালসের একটি নির্দিষ্ট নকশা, যা দিয়ে একটি রিসিভার বার্তার শুরু চিনতে ও নিজের ঘড়ি মেলাতে পারে, তারপর 112টি ডেটা বিট, প্রতি মাইক্রোসেকেন্ডে এক বিট।

একটি বিট কীভাবে পাঠানো হয়: পালস পজিশন মডুলেশন

এক মাইক্রোসেকেন্ডের প্রতিটি বিট-ঘর দুই অর্ধে ভাগ করা। প্রথম অর্ধে বেতার শক্তির একটি পালস আর দ্বিতীয় অর্ধে নীরবতা মানে 1; আগে নীরবতা, তারপর পালস মানে 0। তাই ডেটা যা-ই হোক, প্রতি বিটে ঠিক একটি পালস থাকে, আর রিসিভারকে কেবল ঠিক করতে হয় প্রতিটি ঘরের কোন অর্ধটি বেশি জোরালো ছিল। এই পদ্ধতি, পালস পজিশন মডুলেশন (pulse position modulation), ট্রান্সমিটার থেকে দূরের অ্যান্টেনায় যাওয়ার পথে সংকেত যে ধরনের গোলমাল ও ক্ষীণতার শিকার হয় তার বিরুদ্ধে মজবুত, আর এটি ডিকোড করাও সম্ভব।

পালস পজিশন মডুলেশনে চারটি বিট: 1, 0, 1, 1



প্রতিটি ঘর 1 মাইক্রোসেকেন্ড। প্রথম অর্ধে পালস: 1। দ্বিতীয় অর্ধে পালস: 0।

112টি বিট

DF	CA	ICAO ঠিকানা	ME - মূল বিষয়বস্তু	PI
5 বিট ডাউনলিংক ফরম্যাট	3 বিট সামর্থ্য	24 বিট বিমানের অনন্য পরিচয়	56 বিট অবস্থান, উচ্চতা, বেগ, কল সাইন বা অবস্থা, এর প্রথম 5 বিটের টাইপ কোড অনুযায়ী	24 বিট ক্রটি পরীক্ষা (CRC)

প্রথম পাঁচটি বিট, ডাউনলিংক ফরম্যাট, বলে এটি কোন ধরনের Mode S বার্তা; মান 17 মানে "একটি Mode S ট্রান্সমিটার থেকে ADS-B"। 24-বিট **ICAO ঠিকানা** হলো বিমানের স্থায়ী পরিচয়, যা নিবন্ধনের সময় দেওয়া হয়: 2-এর 24 ঘাত, অর্থাৎ 16 777 216টি সম্ভাব্য ঠিকানা আছে, যা জাতিসংঘের বেসামরিক বিমান চলাচল সংস্থা ICAO ব্লক আকারে রাষ্ট্রগুলোকে বরাদ্দ করে। উদাহরণস্বরূপ, বেলজিয়ামের বিমানগুলো বহন করে হেক্সাডেসিমালে 448000 থেকে 44FFFF পর্যন্ত ঠিকানা। পুরোনো Mode A-এর চার অঙ্কের কোডের বিপরীতে এই ঠিকানা কখনো বদলায় না আর কখনো ভাগাভাগি হয় না, তাই একটি রিসিভার একেবারে প্রথম বার্তা থেকেই নিশ্চিত হতে পারে কোন বিমানকে সে শুনছে।

56-বিট **ME** ফিল্ডই আসল বিষয়বস্তু, আর এর প্রথম পাঁচ বিট, **টাইপ কোড**, বলে বাকিটার মানে কী। টাইপ কোড 1 থেকে 4 বহন করে বিমানের কল সাইন, যেমন BEL1234 বা RYR7KL, ছয়-বিটের আটটি অক্ষর হিসেবে। কোড 9 থেকে 18 বহন করে ব্যারোমিটারের উচ্চতাসহ আকাশে অবস্থান; 20 থেকে 22 একই জিনিস উপগ্রহ-উচ্চতাসহ। কোড 19 বহন করে বেগ: ভূমি-গতিকে পূর্ব-পশ্চিম ও উত্তর-দক্ষিণ উপাংশে ভাগ করে, উল্লম্ব হার, আর ব্যারোমিটারের ও উপগ্রহ-উচ্চতার পার্থক্য। কোড 28, 29 ও 31 বহন করে অবস্থা: জরুরি কোড, নির্বাচিত উচ্চতা, আর অখণ্ডতা ও নির্ভুলতার শ্রেণি, যা বলে সম্প্রচারিত অবস্থানকে কতটা বিশ্বাস করা যায় (ধরুন, "NIC" 8 হলে প্রতিশ্রুতি হলো প্রকৃত অবস্থান জানানো অবস্থানের 185 m-এর মধ্যে, উচ্চ সম্ভাবনায়)।

শেষ 24টি বিট একটি **সাইক্লিক রিডান্ড্যান্সি চেক (cyclic redundancy check)**, আগের 88 বিট থেকে একটি নির্দিষ্ট বহুপদী ভাগের মাধ্যমে হিসাব করা একটি সংখ্যা। রিসিভার তার ডিকোড করা বিটগুলোর উপর একই হিসাব আবার করে; ফল না মিললে পথে অন্তত একটি বিট নষ্ট হয়েছে, আর বার্তাটি বাতিল করা হয়। এক মাইক্রোসেকেন্ডের একটি পালস গোলমালে বা অন্য বিমানের বার্তার সঙ্গে ওভারল্যাপে সহজেই হারিয়ে যেতে পারে, তাই এই পরীক্ষাই কন্ট্রোলারের পর্দা থেকে বিকৃত অবস্থান দূরে রাখে। একটি রিসিভার যেভাবে লগ করবে, একটি বাস্তব বার্তা দেখতে এমন:

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: ডাউনলিংক ফরম্যাট 17, সামর্থ্য 5। 4840D6: ICAO ঠিকানা, একটি ডাচ বিমান। 20...: টাইপ কোড 4, একটি পরিচয়-বার্তা, যা ডিকোড করলে পাওয়া যায় কল সাইন KLM1023। 576098: ক্রটি পরীক্ষা।

34 বিটে পৃথিবীকে আঁটানো

একটি অবস্থান-বার্তায় অক্ষাংশের জন্য মাত্র 17 বিট আর দ্রাঘিমাংশের জন্য 17 বিট আছে। পুরো পৃথিবী ঘুরে তা 131 072টি ধাপ, বিশ্ববরেখায় প্রতিটি প্রায় 300 m: মোটেই যথেষ্ট নয়। ADS-B এটি সমাধান করে **কমপ্যাক্ট পজিশন রিপোর্টিং (compact position reporting)** দিয়ে। পৃথিবীকে কয়েকটি অঞ্চলে ভাগ করা হয়; 17 বিট একটি অঞ্চলের মধ্যে খুব নিখুঁত অবস্থান দেয় (প্রায় 5 m পর্যন্ত), কিন্তু কোন অঞ্চল তা বলে না। বিমান পালা করে দুটি সামান্য ভিন্ন অঞ্চল-জাল ব্যবহার করে, "জোড়" ও "বিজোড়" বার্তা, আর যে রিসিভার দুটির একটি করে শুনেছে, সে দ্ব্যর্থহীনভাবে অঞ্চলটি বের করতে পারে। একবার তা হলে বিমানকে অনুসরণ করতে একটি বার্তাই যথেষ্ট, কারণ আধা সেকেন্ডে সে অন্য অঞ্চলে লাফ দিয়েছে এমন প্রায় হতেই পারে না। এটি একটি চমৎকার কৌশল, যা একটিও বিট খরচ না করে কার্যকর নির্ভুলতা দ্বিগুণ করে।

কত ঘন ঘন

উড্ডয়নরত একটি ট্রান্সপন্ডার প্রতি সেকেন্ডে দুবার একটি অবস্থান-বার্তা, প্রতি সেকেন্ডে দুবার একটি বেগ-বার্তা, আর প্রতি পাঁচ সেকেন্ডে তার কল সাইন পাঠায়, সঙ্গে দীর্ঘতর বিরতিতে অবস্থা-বার্তা, সব মিলিয়ে প্রতি সেকেন্ডে প্রায় চার থেকে পাঁচটি এক্সটেন্ডেড স্কুইটার। প্রতিটি 120 মাইক্রোসেকেন্ড স্থায়ী; আসলে ট্রান্সপন্ডার সময়ের এক হাজার ভাগের এক ভাগেরও অনেক কম সময় ADS-B সম্প্রচার করে। সেকেন্ডের বাকি সময়টা সে 1030 MHz-এ রাডারের জিজ্ঞাসা ও অন্য বিমানের সংঘর্ষ-এড়ানোর প্রশ্ন শোনে আর তার উত্তর দেয়।

অধ্যায় 6 - পদার্থবিজ্ঞান

তরঙ্গ: অদৃশ্য আলো হিসেবে বেতার

বার্তাটি বিমান ছেড়ে যায় একটি **বেতার তরঙ্গ (radio wave)** হিসেবে, আর এই কোর্সের সবচেয়ে কাজের ধারণাটি হলো: একটি বেতার তরঙ্গ ও একটি আলোকরশ্মি একই জিনিস। দুটিই তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ: বৈদ্যুতিক ও চৌম্বক ক্ষেত্রের একটি নকশা, যা একসঙ্গে দোলে ও মহাশূন্যের মধ্য দিয়ে আলোর গতি c -তে চলে, যা সেকেন্ডে 299 792 458 মিটার, বা মোটামুটি 300 000 km/s। একটি বেতার তরঙ্গকে সবুজ আলো থেকে, হাসপাতালের X-রশ্মি থেকে বা রান্নাঘরের মাইক্রোওয়েভ ওভেনের মাইক্রোওয়েভ থেকে যা আলাদা করে তা কেবল ক্ষেত্রগুলো কত দ্রুত দোলে: **কম্পাঙ্ক (frequency)**, f , যা মাপা হয় হার্টজে (প্রতি সেকেন্ডে দোলন)।

তরঙ্গ যেহেতু একটি নির্দিষ্ট গতিতে চলে, কম্পাঙ্কই ঠিক করে দেয় এক চূড়া থেকে পরের চূড়ার দূরত্ব, **তরঙ্গদৈর্ঘ্য (wavelength)**, λ । এক সেকেন্ডে তরঙ্গ c মিটার যায় ও f -টি দোলন সম্পূর্ণ করে, তাই প্রতিটি দোলন দখল করে c / f মিটার:

$$c = f \times \lambda$$

ADS-B-এর জন্য: $\lambda = 300\,000\,000 / 1\,090\,000\,000 = 0.275\text{ m}$ । বিমান ও আপনার অ্যান্টেনার মধ্যের তরঙ্গের চূড়াগুলো 27.5 cm দূরে দূরে, মোটামুটি একটি স্কুল রুলারের দৈর্ঘ্য।

তরঙ্গ	কম্পাঙ্ক	তরঙ্গদৈর্ঘ্য	মন্তব্য
FM বেতার সম্প্রচার	100 MHz	3 m	গাড়ির অ্যান্টেনা এর একটি ভগ্নাংশ
ADS-B / Mode S	1 090 MHz	27.5 cm	রাদার ট্রান্সপন্ডারের উত্তরেও ব্যবহৃত
মোবাইল ফোন (4G ব্যান্ড)	1 800 MHz	17 cm	বর্ণালিতে কাছের প্রতিবেশী
Wi-Fi, মাইক্রোওয়েভ ওভেন	2 450 MHz	12 cm	একই কম্পাঙ্ক, বিপুল ভিন্ন শক্তি
দৃশ্যমান সবুজ আলো	560 000 000 MHz	0.000 54 mm	কম্পাঙ্কে আধা মিলিয়ন গুণ বেশি

এরপরের সবকিছুর জন্য দুটি পরিণতি গুরুত্বপূর্ণ। প্রথমত, তরঙ্গটি যেহেতু আলো, কিছু তাকে বাঁকিয়ে বা আটকে না দিলে সে সরলরেখায় চলে, আর সে পৃথিবীর ভেতর দিয়ে যায় না। এটিই ব্যবস্থার সীমা ঠিক করে, যা অধ্যায় 7-এর বিষয়। দ্বিতীয়ত, এর তরঙ্গদৈর্ঘ্য যেহেতু 27.5 cm, যে ধাতব কাঠামোগুলো এর সঙ্গে সবচেয়ে জোরালোভাবে মিথস্ক্রিয়া করে, অ্যান্টেনা, সেগুলোর আকার ওই মাপের, যা অধ্যায় 8-এর বিষয়।

বেতার কেন শব্দ নয়

সবচেয়ে সাধারণ বিভ্রান্তি, বড়দের মধ্যেও শিশুদের মতোই, বেতার ও শব্দের মধ্যে, সম্ভবত কারণ "রেডিও" একটি বাক্স যা শব্দ তৈরি করে। এরা সম্পর্কহীন ঘটনা। শব্দ হলো বাতাসে চাপের একটি তরঙ্গ, অণুগুলোর প্রতিবেশীকে ধাক্কা দেওয়ার একটি শৃঙ্খল; এর চলার জন্য একটি মাধ্যম লাগে, এটি 340 m/s বেগে চলে, আর শূন্যস্থান পার হতে পারে না। বেতারের কিছুই লাগে না: এটি উপগ্রহ ও বিমানের মধ্যের শূন্যস্থান পার হয়, আর প্রায় এক মিলিয়ন গুণ দ্রুত চলে। বিমানের ইঞ্জিনের শব্দ ও তার ADS-B বার্তা একই মুহূর্তে তাকে ছেড়ে যায়; বার্তাটি 20 km দূরের একটি রিসিভারে পৌঁছায় 67 মাইক্রোসেকেন্ডে, শব্দটি পুরো এক মিনিট পরে।

কেন 1090 MHz

কম্পাঙ্কটি একটি উত্তরাধিকার। 1950-এর দশকের আন্তর্জাতিক চুক্তি 960 থেকে 1215 MHz ব্যান্ডটি বৈমানিক বেতার-নেভিগেশনের জন্য সংরক্ষিত করে, আর 1090 MHz হয়ে ওঠে সেকেন্ডারি রাদার ট্রান্সপন্ডারের উত্তরের কম্পাঙ্ক। ADS-B যখন নকশা করা হয়, প্রতিটি যাত্রীবাহী বিমানে ইতিমধ্যে লাগানো ট্রান্সপন্ডারটি আবার ব্যবহার করা একটি নতুন রেডিও বসানোর চেয়ে অনেক সস্তা ছিল, তাই ADS-B কেবল হয়ে উঠল আরেকটি জিনিস, যা Mode S ট্রান্সপন্ডার 1090 MHz-এ বলে। যুক্তরাষ্ট্রে প্রায় 5 500 m-এর নিচে ওড়া ছোট বিমান এর বদলে দ্বিতীয় একটি ব্যবস্থা ব্যবহার করতে পারে, 978 MHz-এ UAT, এ কারণেই সেখানকার রিসিভারগুলো প্রায়ই দুটিই শোনে।

অধ্যায় 7 - পদার্থবিজ্ঞান

পাল্লা: পৃথিবীর বাঁক ও সংকেতের ক্ষীণ হওয়া

একটি ট্রান্সপন্ডার কয়েকশ ওয়াটের সর্বোচ্চ শক্তিতে সম্প্রচার করে। এমন একটি সংকেত কত দূর থেকে শোনা যায়? দুটি একেবারে ভিন্ন জিনিস একে সীমাবদ্ধ করে, আর সেগুলোকে আলাদা রাখা জরুরি: জ্যামিতি, যা একটি কঠিন সীমা টানে, আর শক্তি, যা একটি নরম সীমা টানে।

বেতার দিগন্ত

1090 MHz-এ বেতার আলোর মতো আচরণ করে: সরলরেখায় চলে আর পৃথিবীকে ঘিরে বাঁকে না। তাই একটি ভূমি অ্যান্টেনা একটি বিমানকে কেবল ততক্ষণ শুনতে পারে, যতক্ষণ তাদের মধ্যে এমন একটি সরলরেখা আছে যা মাটির ভেতর দিয়ে যায় না। পৃষ্ঠে দাঁড়ানো একজন পর্যবেক্ষকের জন্য দিগন্ত হলো যেখানে সেই রেখা পৃথিবীকে ঠিক ছুঁয়ে যায়। বিমান যত উঁচুতে, সেই স্পর্শবিন্দু তত দূরে; অ্যান্টেনা যত উঁচুতে, আরও তত দূরে। একটি গোলকের স্পর্শকের জ্যামিতি একটি সরল ফল দেয়: কিলোমিটারে দিগন্তের দূরত্ব প্রায় 3.57 গুণ মিটারে উচ্চতার বর্গমূল। বায়ুমণ্ডল বেতারকে সামান্য নিচের দিকে বাঁকায়, যা দিগন্তকে প্রায় 15 শতাংশ প্রসারিত করে, তাই প্রকৌশলীরা এর বদলে 4.12 ব্যবহার করেন:

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h \text{ (m)}} + \sqrt{h \text{ (m)}}) \quad \text{যেখানে } h \text{ (m) হলো অ্যান্টেনা ও বিমানের উচ্চতা}$$

বিমান 11 000 m-এ, অ্যান্টেনা 20 m ছাদে: $4.12 \times (104.9 + 4.5) = 451 \text{ km}$ । বিমান 1 000 m-এ, একই ছাদে: $4.12 \times (31.6 + 4.5) = 149 \text{ km}$ । 15 km দূরে মাটিতে থাকা বিমান: একেবারেই শোনা যায় না, যদি না মাঝের জমি সমতল ও খোলা হয়।



এটিই একটি রিসিভারের কভারেজের চরিত্রগত আকৃতি ব্যাখ্যা করে: উঁচুতে ওড়া বিমানের জন্য 400 km বা তার বেশি ব্যাসার্ধের একটি বৃত্ত, যা অবতরণের পথে থাকা বিমানের জন্য কয়েক দশ কিলোমিটারে সংকুচিত হয়, আর মাটিতে থাকা বিমানের জন্য পাশের বিমানবন্দর ছাড়া প্রায় কিছুই নয়। এটি আরও ব্যাখ্যা করে কেন রিসিভারের উচ্চতা রিসিভারের মানের চেয়ে অনেক বেশি গুরুত্বপূর্ণ, আর কেন একটি পাহাড়, একটি উঁচু ভবন, এমনকি বিমানের নিজের ডানাও, যখন সে আপনার থেকে দূরে কাত হয়, একটি সংকেত মুহূর্তে কেটে দিতে পারে।

বিপরীত বর্গ সূত্র

দিগন্তের মধ্যে, সংকেত দূরত্বের সঙ্গে ক্ষীণ হয়। একটি ট্রান্সপন্ডারের অ্যান্টেনা সব অনুভূমিক দিকে বিকিরণ করে, তাই তার শক্তি ক্রমশ বড় একটি গোলকের উপর ছড়িয়ে পড়ে। গোলকের ক্ষেত্রফল বাড়ে তার ব্যাসার্ধের বর্গের সঙ্গে, তাই একটি নির্দিষ্ট আকারের অ্যান্টেনায় পড়া শক্তি কমে দূরত্বের বর্গের সঙ্গে: দ্বিগুণ দূরে, এক-চতুর্থাংশ শক্তি; দশ গুণ দূরে, একশ ভাগের এক ভাগ। প্রকৌশলীরা একে ডেসিবেলে পথ ক্ষয় (path loss) হিসেবে প্রকাশ করেন, আর 1090 MHz-এ 400 km দূরত্বে তা দাঁড়ায় প্রায় 145 dB, অর্থাৎ গৃহীত শক্তি সম্প্রচারিত শক্তির চেয়ে প্রায় 10-এর 14.5 ঘাত গুণ ছোট। 250 ওয়াটের একটি পালস পৌঁছায় মোটামুটি এক মিলিওয়াটের দশ বিলিয়ন ভাগের এক ভাগ হয়ে। একটি ভালো রিসিভার সেটি শনাক্ত করতে পারে, কোনোমতে, আর এ কারণেই জ্যামিতিক দিগন্ত ও শক্তির সীমা কয়েকশ কিলোমিটারে মিলে যায়: ব্যবস্থাটি সেভাবেই নকশা করা হয়েছিল।

এই দুটি সীমা যেভাবে পরস্পরকে প্রভাবিত করে তা বোঝার মতো। দিগন্তের মধ্যে, কাছের বিমানের একটি শক্তিশালী সংকেত ও দূরের বিমানের একটি দুর্বল সংকেত দুটিই নিখুঁতভাবে ডিকোড হয়, কারণ অধ্যায় 5-এর পালস পজিশন পদ্ধতি কেবল জানতে চায় প্রতিটি বিট-ঘরের কোন অর্ধ বেশি জোরালো ছিল, কতটা জোরালো তা নয়। বিমান দূরে সরে গেলে

সংকেত ধীরে ধীরে অকেজো হয়ে যায় না; এটি ডিকোডযোগ্য থাকে যতক্ষণ না দিগন্তের কাছে কোথাও হয় জ্যামিতি একে কেটে দেয়, নয়তো রিসিভারের গোলমাল শেষমেশ একে ডুবিয়ে দেয়, আর ট্র্যাক থেমে যায়। এ কারণেই কভারেজ মানচিত্রের কিনারা তীক্ষ্ণ, আর এ কারণেই একটি রিসিভার যে সবচেয়ে দূরের বিমানগুলো শোনে সেগুলো প্রায় সবসময় সবচেয়ে উঁচুতে থাকা বিমান।

অধ্যায় ৪ - পদার্থবিজ্ঞান

অ্যান্টেনা: ২৭ সেন্টিমিটারের একটি তরঙ্গ ধরা

একটি অ্যান্টেনা হলো এমনভাবে গড়া একটি পরিবাহীর টুকরো, যাতে পাশ দিয়ে যাওয়া একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ তার ভেতরের ইলেকট্রনগুলোকে তালে তালে নাড়িয়ে একটি ক্ষুদ্র পরিবর্তী প্রবাহ তৈরি করে, যা একটি রিসিভার বিবর্ধিত করতে পারে। ট্রান্সমিটারে উল্টোটা ঘটে: বিমানের অ্যান্টেনায় একটি পরিবর্তী প্রবাহ তরঙ্গটিকে ছুড়ে দেয়। এই বিনিময়ের দক্ষতা নির্ভর করে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় পরিবাহীর আকারের উপর। একটি সোজা তার সবচেয়ে জোরালোভাবে সাড়া দেয়, *অনুনাদ* (resonance) করে, যখন এটি অর্ধ তরঙ্গদৈর্ঘ্য লম্বা হয়, যাতে এর বরাবর সামনে-পিছনে দোলা প্রবাহ তরঙ্গের দোলনের সঙ্গে ঠিক মিলে যায়, যেমন একটি শিশুর দোলনা তার স্বাভাবিক ছন্দে ঠেলা হলে। 1090 MHz-এ অর্ধ তরঙ্গদৈর্ঘ্য 13.75 cm।

সবচেয়ে প্রচলিত ব্যবহারিক রূপ হলো **চতুর্থাংশ-তরঙ্গ মনোপোল (quarter-wave monopole)**: তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এক-চতুর্থাংশ লম্বা, 6.9 cm, একটি খাড়া দণ্ড, যা দাঁড়িয়ে থাকে একটি পরিবাহী পৃষ্ঠের উপর, *গ্রাউন্ড প্লেন* (ground plane)। গ্রাউন্ড প্লেন আয়নার মতো কাজ করে, তাই দণ্ড ও তার প্রতিবিম্ব মিলে একটি অর্ধ-তরঙ্গ অ্যান্টেনার মতো আচরণ করে। এ কারণেই একটি বিমানের ADS-B অ্যান্টেনা ফিউজেলাজের গায়ে কয়েক সেন্টিমিটার উঁচু একটি খাটো পাত, যেখানে ফিউজেলাজই গ্রাউন্ড প্লেন, আর এ কারণেই একজন শখের মানুষের অ্যান্টেনা একটি টিনের ঢাকনার উপর ছোট একটি তার। ভুল দৈর্ঘ্যের তারও কাজ করে, কিন্তু অনেক কম ভালো: "ধাতুর কান" সুর বাঁধা।

অ্যান্টেনার আরও তিনটি ধর্ম পদার্থবিজ্ঞান থেকে আসে, আর প্রতিটির একটি দৃশ্যমান পরিণতি আছে। প্রথমটি **সমবর্তন (polarisation)**। একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র তার চলার দিকের সঙ্গে সমকোণে একটি নির্দিষ্ট দিকে দোলে, আর একটি অ্যান্টেনা কেবল ক্ষেত্রের সেই উপাংশে সাড়া দেয় যা তার নিজের দৈর্ঘ্য বরাবর। বিমানের অ্যান্টেনা খাড়াভাবে বসানো, তাই ADS-B তরঙ্গ খাড়াভাবে সমবর্তিত হয়ে আসে, আর গ্রহণকারী অ্যান্টেনাকেও খাড়া হতে হয়; কাত করে শুইয়ে দিলে সে প্রায় কিছুই শোনে না, যেমন উপর-নিচে ঝাঁকানো দড়ির তরঙ্গ একটি অনুভূমিক ফাঁকে আটকে যায়। দ্বিতীয়টি **বিকিরণ নকশা (radiation pattern)**। একটি খাড়া অ্যান্টেনা দিগন্তের দিকে সবচেয়ে সংবেদনশীল আর নিজের অক্ষ বরাবর একেবারেই নয়, তাই ত্রিমাত্রিক জায়গায় তার সংবেদনশীলতার আকৃতি একটি রিং ডোনাটের মতো, যার ছিদ্রের মধ্য দিয়ে অ্যান্টেনাটি যায়। তাই রিসিভারগুলো নিয়মিতই 300 km দূরের বিমান অনায়াসে শোনে, অথচ ঠিক মাথার উপর দিয়ে যাওয়া একটি বিমানকে কয়েক সেকেন্ডের জন্য হারায়, যেকোনো লাইভ মানচিত্রে লক্ষ করার মতো একটি জিনিস। কয়েকটি অনুনাদী উপাদান একটির উপর আরেকটি সাজালে ডোনাটটি চ্যাপটা হয়ে যায়, সংবেদনশীলতা দিগন্তের দিকে ঘনীভূত হয়, যেখানে দূরের বিমানগুলো থাকে, মাথার উপরের দিকটার বিনিময়ে; অ্যান্টেনার **গেইন (gain)** বলতে এটিই বোঝায়, আর এটি সবসময় সংবেদনশীলতার পুনর্বণ্টন, কখনোই সৃষ্টি নয়।

তৃতীয়টি অ্যান্টেনা ও রিসিভারের মাঝে যা থাকে তা নিয়ে। অ্যান্টেনা শুধু 1090 MHz নয়, আশপাশের প্রতিটি সংকেত ধরে, যার মধ্যে আছে কয়েকশ মেগাহার্টজ দূরের মোবাইল ফোনের সম্প্রচার, যা বিপুল পরিমাণে শক্তিশালী, তাই প্রথমেই বসানো হয় একটি ফিল্টার যা কেবল বিমান চলাচলের ব্যান্ডটি পার হতে দেয়। তারপর সংকেতকে একটি কেবল বেয়ে নামতে হয়, আর 1090 MHz-এ একটি কোঅ্যাক্সিয়াল কেবল প্রতি দশ মিটারে মোটামুটি অর্ধেক সংকেত হারায়; প্রতিকার হলো অ্যান্টেনার কাছে, কেবলের আগে, একটি লো-নয়েজ অ্যামপ্লিফায়ার, যাতে সংকেত যাত্রাটুকু টিকে থাকার মতো যথেষ্ট

শক্তিশালী হয়, রিসিভারের কাছে নয়, যেখানে বিবর্ধন করলে সংকেতের অবশিষ্টাংশের সঙ্গে কেবলের গোলমালও বিবর্ধিত হতো। এগুলো খুঁটিনাটি, কিন্তু এই খুঁটিনাটিই ঠিক করে স্কুলের ছাদের একটি রিসিভার দিগন্তের বিমান শুনবে, নাকি কেবল কাছেরগুলো।

অধ্যায় ৯

গ্রহণ ও ডিকোড করা

অ্যান্টেনা থেকে মানচিত্রের একটি বিন্দু পর্যন্ত পাঁচটি ধাপের একটি শৃঙ্খল। অ্যান্টেনা পাশ দিয়ে যাওয়া তরঙ্গকে কয়েক মাইক্রোভোল্টের একটি পরিবর্তী প্রবাহে বদলায়। একটি ফিল্টার ও একটি লো-নয়েজ অ্যামপ্লিফায়ার 1090 MHz ব্যান্ডটি রাখে, বাকি সব বাদ দেয়, আর সংকেতকে হাজার গুণ বাড়ায়। একটি সফটওয়্যার-নির্ধারিত রেডিও কম্পাঙ্কে টিউন করে ও সংকেতের প্রতি সেকেন্ডে দুই মিলিয়ন নমুনা নেয়, একে সংখ্যার একটি ধারায় বদলে দেয়। একটি ডিকোডার সেই ধারায় প্রিঅ্যাম্বলের নকশা খোঁজে, 112টি বিট পড়ে নেয়, প্যারিটি পরীক্ষা করে ও ফিল্ডগুলো ডিকোড করে। আর একটি ট্র্যাকার প্রতিটি বিমানের বার্তাগুলোকে জড়ো করে একটি একক, অবিরাম হালনাগাদ রেকর্ডে: একটি অবস্থান, একটি ট্র্যাক, একটি লেবেল।

অসাধারণ ধাপটি হলো তৃতীয়টি। প্রায় 2010 সাল পর্যন্ত 1090 MHz ডিকোড করতে লাগত হাজার হাজার ইউরোর বিশেষভাবে তৈরি হার্ডওয়্যার। তারপর শখের মানুষেরা আবিষ্কার করলেন যে 20 ইউরোর একটি USB টেলিভিশন টিউনারে এমন একটি চিপ আছে, যাকে যেকোনো কম্পাঙ্কে টিউন করতে বলা যায় ও কাঁচা সংকেত একটি কম্পিউটারের হাতে তুলে দিতে বলা যায়। এই **সফটওয়্যার-নির্ধারিত রেডিও (software-defined radio)** বেতারের সমস্যাকে প্রোগ্রামিংয়ের সমস্যায় বদলে দেয়: একটি ল্যাপটপ বা একটি Raspberry Pi সংকেতের শক্তি বর্ণনা করা প্রতি সেকেন্ডে দুই মিলিয়ন সংখ্যার একটি ধারা পায়, আর বিনামূল্যের সফটওয়্যার প্রিঅ্যাম্বলের নকশা খোঁজে, প্রতিটি মাইক্রোসেকেন্ড ঘরের কোন অর্ধ বেশি জোরালো তা মাপে, 112টি বিট জোড়া লাগায়, CRC হিসাব করে, আর ফিল্ডগুলো ছাপে। মাধ্যমিক কিটের রিসিভার প্রকল্পটি ঠিক এই শৃঙ্খল, আর একটি স্কুল 100 ইউরোর কমে এটি বানাতে পারে।

ট্র্যাকার ধাপেই বার্তার ধারা জ্ঞানে পরিণত হয়। মনে রাখুন, একটি একক অবস্থান-বার্তা দ্ব্যর্থক, যতক্ষণ না একটি জোড় ও একটি বিজোড় বার্তা জোড়া লাগানো হয়। বেগ আসে অবস্থান থেকে আলাদাভাবে, কল সাইন আবার আলাদাভাবে, আর ট্র্যাকার ICAO ঠিকানা দিয়ে সেগুলো সেলাই করে, ক্রটি পরীক্ষায় ব্যর্থ যা কিছু তা বাতিল করে, আর প্রতিটি বিমানের শেষ জানা অবস্থা ধরে রাখে। এক মিনিট কোনো বার্তা না এলে, সাধারণত বিমান দিগন্তের নিচে নেমে যাওয়ায়, ট্র্যাকারটির মেয়াদ শেষ হয়।

অধ্যায় 10

একটি রিসিভার থেকে একটি মহাদেশের মানচিত্র

একটি রিসিভার শোনে কয়েকশ কিলোমিটার চওড়া আকাশের একটি বৃত্ত। ইউরোপের মানচিত্রের জন্য লাগে শত শত, আর কাজের রিসিভারগুলো শহরে নয়, ছড়ানো: উপকূলে, উপত্যকায়, দ্বীপে, যেখানেই অন্য রিসিভারের বৃত্ত পৌঁছায় না। প্রতিটি রিসিভার তার ডিকোড করা বার্তাগুলো, প্রতিটিতে পৌঁছানোর সময় লিখে, ইন্টারনেটের মাধ্যমে একটি কেন্দ্রীয় সেবায় পাঠায়। সেই সেবা *সমষ্টিকরণ* করে: একটি উঁচু বিমানের একই বার্তা সাধারণত একসঙ্গে দশ বা বিশটি রিসিভার থেকে আসে, আর পুনরাবৃত্তিগুলো চিনে একত্র করতে হয়। সে পরীক্ষাও করে: যে অবস্থান একই বিমান সম্পর্কে প্রতিবেশী প্রতিটি রিসিভারের মতের সঙ্গে মেলে না, তা সম্ভবত একটি ডিকোডিং ক্রটি বা একটি ক্রটিপূর্ণ ট্রান্সপন্ডার, আর তাকে চিহ্নিত বা বাদ দেওয়া হয়।

মাল্টিল্যাটারেশন: যে বিমান বলে না সে কোথায়, তাকে খুঁজে বের করা

সব বিমান অবস্থান সম্প্রচার করে না। পুরোনো ট্রান্সপন্ডারগুলো রাডারকে পরিচয় ও উচ্চতা দিয়ে উত্তর দেয় কিন্তু তাদের কোনো উপগ্রহ-ইনপুট নেই; কিছু বিমান ইচ্ছাকৃতভাবে কিছুই পাঠায় না। তবু তাদের 1090 MHz সম্প্রচার মাটিতে পৌঁছায়, আর একটি নেটওয়ার্ক উপগ্রহ নেভিগেশনকে উল্টে দিয়ে তাদের খুঁজে বের করতে পারে। নিখুঁতভাবে মেলানো ঘড়িসহ চারটি রিসিভার যদি প্রত্যেকে একই সম্প্রচার পৌঁছানোর মুহূর্তটি লিখে রাখে, সেই মুহূর্তগুলোর পার্থক্য প্রকাশ করে দূরত্বের পার্থক্য: যে বার্তা রিসিভার B-এর এক মাইক্রোসেকেন্ড আগে রিসিভার A-তে পৌঁছেছে, তা পাঠানো হয়েছে এমন একটি বিন্দু থেকে যা B-এর চেয়ে A-এর 300 m কাছে। এই ধর্মের সব বিন্দু A ও B-এর মাঝে একটি বক্র তলের উপর থাকে, একটি হাইপারবোলয়েড। চারটি রিসিভার থেকে এমন তিনটি তল বিমানটিতে ছেদ করে। এটিই **মাল্টিল্যাটারেশন (multilateration)**, আর শত শত কিলোমিটার দূরে দূরে থাকা রিসিভারগুলোর মধ্যে এটি দাবি করে প্রায় এক মাইক্রোসেকেন্ডের দশ ভাগের এক ভাগ, 30 m, পর্যন্ত সময়-নির্ভুলতা, যা রিসিভারগুলো পায় সেই একই উপগ্রহ থেকে যা বিমান ব্যবহার করে।

একই ধারণা, দুবার

উপগ্রহ নেভিগেশন: একটি রিসিভার, চারটি ট্রান্সমিটার যাদের অবস্থান জানা, রিসিভারের অবস্থান বের করো।

মাল্টিল্যাটারেশন: একটি ট্রান্সমিটার, চারটি রিসিভার যাদের অবস্থান জানা, ট্রান্সমিটারের অবস্থান বের করো। দুটিতেই যা আসলে মাপা হয় তা সময়, আর 1 মাইক্রোসেকেন্ড মানে 300 মিটার।

অধ্যায় 11

এটি কী কাজে লাগে, আর কোথায় কম পড়ে

এয়ার ট্রাফিক কন্ট্রোল প্রথম গ্রাহক। সারা ইউরোপে কন্ট্রোলাররা এখন একটি মিশ্রিত ছবি দেখেন, যেখানে ADS-B, তার প্রতি সেকেন্ডে দুবার হালনাগাদ ও উপগ্রহ-মানের নির্ভুলতাসহ, রাডার ও মাল্টিল্যাটারেশনের সঙ্গে মেলানো; যেখানে রাডার কখনো পৌঁছায়নি, উত্তর আটলান্টিক, আর্কটিক, সাহারা ও বেশিরভাগ মহাসাগরের উপরে, ADS-B বার্তা ধরে নিম্ন-কক্ষপথের যোগাযোগ উপগ্রহে বসানো রিসিভার, যার ফলে আটলান্টিক পার হওয়া বিমানগুলোকে আগের চেয়ে অনেক কাছাকাছি রাখা সম্ভব হয়েছে। বিমান দ্বিতীয় গ্রাহক: "ADS-B In"-সহ একটি যাত্রীবাহী বিমান কাছের ট্রাফিক তার ক্রুকে দেখায় ও সংঘর্ষ-এড়ানোর ব্যবস্থায় তা পাঠায়। বিমানবন্দরগুলো কুয়াশায় মাটিতে বিমান ও যানবাহন ট্র্যাক করতে এটি ব্যবহার করে। গবেষকরা উন্মুক্ত তথ্য দিয়ে শব্দ, জ্বালানি ব্যবহার, কন্ট্রোল ও বিলম্ব নিয়ে গবেষণা করেন। আর স্কুলের ছাদের একটি রিসিভার, ছোট পরিসরে, এই সবকিছুর একজন অংশীদার।

ব্যবস্থাটির দুর্বলতাগুলো সরাসরি তার নকশা থেকে আসে, আর প্রতিটি কেবল তালিকাভুক্ত করার বদলে বোঝার মতো। বার্তাগুলো যেহেতু খোলাখুলি সম্প্রচারিত, এনক্রিপ্টও নয়, স্বাক্ষরিতও নয়, বার্তার নিজের মধ্যে এমন কিছু নেই যা প্রমাণ করে তা একটি বিমান থেকে এসেছে। মাটিতে একটি ট্রান্সমিটার, বেআইনিভাবে, এমন একটি নিখুঁত গঠনের বার্তা সম্প্রচার করতে পারে যা অস্তিত্বহীন একটি বিমানের বর্ণনা দেয়, আর একটি রিসিভার বিনা আপত্তিতে তা ডিকোড করবে। ব্যবস্থাটিকে যা রক্ষা করে তা বার্তা নয়, বরং তার চারপাশের প্রেক্ষাপট: একটি ভূত রাডারে দেখা দেবে না, মাল্টিল্যাটারেশনে পাওয়া যাবে না, আর আসল ট্রাফিকের মতো আচরণ করবে না, আর কন্ট্রোল সেন্টারগুলো অবিরাম মিলিয়ে দেখে। ক্রিপ্টোগ্রাফিক স্বাক্ষরসহ প্রোটোকলের একটি সংস্করণ নিয়ে বহু বছর আলোচনা হয়েছে; বাধাটি কারিগরির চেয়ে বেশি ব্যবহারিক, কারণ পৃথিবীর প্রতিটি ট্রান্সপন্ডার বদলাতে হবে।

অবস্থান যেহেতু বিমানের উপগ্রহ রিসিভারের উপর নির্ভরশীল, উপগ্রহ নেভিগেশনকে যা বিঘ্নিত করে তা ADS-B-কেও বিঘ্নিত করে। সংঘাতপূর্ণ এলাকার কাছে উপগ্রহ সংকেতে জ্যামিং ও স্পুফিং সাধারণ হয়ে উঠেছে, আর এমন এলাকার মধ্য দিয়ে ওড়া একটি বিমান হয়তো অবস্থান হিসাব করতে পারে না, বা ভুল একটি হিসাব করে। তখন তার বার্তাগুলো একটি অবনত অখণ্ডতার শ্রেণি বহন করে, কন্ট্রোলারের ব্যবস্থা সেগুলো চিহ্নিত করে, আর রাডার, সেই স্বাধীন পরিমাপ যাকে ADS-B কখনোই পুরোপুরি প্রতিস্থাপন করার জন্য তৈরি হয়নি, দায়িত্ব নেয়। তাই দুটির সম্পর্ক উত্তরসূরি ও পূর্বসূরির নয়, বরং পরিপূরক দুর্বলতাসহ অংশীদারের।

বাধ্যবাধকতা যেহেতু যাত্রীবাহী ও বেশিরভাগ বড় বিমানকে ঢাকে, কিন্তু যা কিছু ওড়ে তার সবকিছুকে নয়, মানচিত্রটি নকশাগতভাবেই অসম্পূর্ণ। নিয়ন্ত্রিত আকাশসীমার বাইরের হালকা বিমান, গ্লাইডার, বেলুন ও অনেক সামরিক বিমানে হয়তো ADS-B একেবারেই নেই, আর কিছু হালকা বিমান অন্য ব্যবস্থা ব্যবহার করে যা একটি 1090 MHz রিসিভার শোনে না। আর সম্প্রচার যেহেতু বিমানকে শনাক্ত করে, তা তার মালিককেও শনাক্ত করতে পারে: একটি নির্দিষ্ট ব্যক্তিগত জেটকে অনুসরণ করা কার্যত একটি নির্দিষ্ট মানুষকে অনুসরণ করা, যার ফলে এসেছে এমন কর্মসূচি যা অনুরোধকারী মালিকদের বিমানের নিবন্ধন আড়াল করে, আর একটি চলমান বিতর্ক: একটি বিমান যে তথ্য সারা দুনিয়াকে সম্প্রচার করে, তা কি ব্যক্তিগতও হতে পারে। বড় শিক্ষার্থীদের সামনে রাখার জন্য এটি একটি ভালো বিতর্ক, কারণ পদার্থবিজ্ঞান এর কোনো উত্তর দেয় না।

অধ্যায় 12

একটি সংক্ষিপ্ত ইতিহাস

1935 থেকে 1945

ব্রিটেন, জার্মানি ও যুক্তরাষ্ট্রে প্রাথমিক রাডার তৈরি হয়; যুদ্ধের শেষ নাগাদ "identification friend or foe" ট্রান্সপন্ডার রাডারের পালসের উত্তর দেয় একটি কোডযুক্ত জবাব দিয়ে, সেকেন্ডারি রাডারের পূর্বপুরুষ।

1950 থেকে 1960-এর দশক

বেসামরিক সেকেন্ডারি রাডার মানসম্মত হয়: 1030 MHz-এ জিজ্ঞাসা, 1090 MHz-এ উত্তর, Mode A পরিচয় কোড ও Mode C উচ্চতা।

1980-এর দশক

অন্য 24-বিট ঠিকানা ও তথ্য-বার্তাসহ Mode S তৈরি হয় MIT Lincoln Laboratory-তে এবং ICAO তা গ্রহণ করে। বেসামরিক ব্যবহারকারীদের জন্য GPS চালু হয়।

1990 থেকে 2000-এর দশক

ADS-B সংজ্ঞায়িত ও পরীক্ষিত হয়, বিশেষত আলাস্কা, যেখানে রাডার কভারেজ অসম্ভব ছিল ও দুর্ঘটনা ঘন ঘন ঘটত। 1090 MHz এক্সটেন্ডেড স্কুইটার আন্তর্জাতিকভাবে মানসম্মত হয়।

2010-এর দশক

সস্তা সফটওয়্যার-নির্ধারিত রেডিও গ্রহণকে একটি শেখা পরিণত করে; হাজার হাজার রিসিভারের স্বেচ্ছাসেবক নেটওয়ার্ক গড়ে ওঠে। মহাসাগরীয় কভারেজের জন্য উপগ্রহে রিসিভার পাঠানো হয়।

2020

যুক্তরাষ্ট্রে (জানুয়ারি) ও ইউরোপীয় ইউনিয়নে (জুন, বছরের শেষ পর্যন্ত একটি রূপান্তরকালসহ) নিয়ন্ত্রিত আকাশসীমায় বেশিরভাগ বিমানের জন্য ADS-B বাধ্যতামূলক হয়। আকাশ কথা বলতে শুরু করে, সর্বত্র, সব সময়।

শব্দকোষ

ADS-B

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast।
বিমানের নিজের অবস্থান নিজে সম্প্রচার করা।

ব্যারোমিটারের উচ্চতা

আদর্শ বায়ুমণ্ডল ব্যবহার করে বায়ুচাপ থেকে পাওয়া উচ্চতা;
বিমান যা জানায়।

CPR

Compact position reporting, জোড়/বিজোড় পদ্ধতি যা একটি
নিখুঁত অবস্থানকে 34 বিটে আঁটায়।

CRC

Cyclic redundancy check, প্রতিটি বার্তার শেষের 24-বিট
ত্রুটি পরীক্ষা।

এক্সটেন্ডেড স্কুইটার

112-বিটের স্বতঃস্ফূর্ত Mode S সম্প্রচার, যা ADS-B বহন করে।

GNSS

Global navigation satellite system: GPS, Galileo,
GLONASS, BeiDou।

ICAO ঠিকানা

একটি বিমানের ট্রান্সপন্ডারের স্থায়ী 24-বিট পরিচয়।

Mode S

বাছাইযোগ্য সেকেন্ডারি রাডার মান, যার উপর ADS-B গড়া।

মাল্টিপ্যাটারেশন

কয়েকটি রিসিভারে সংকেত পৌঁছানোর সময়ের পার্থক্য থেকে
একটি ট্রান্সমিটারের অবস্থান নির্ণয়।

পথ ক্ষয়

বিপরীত বর্গ সূত্র মেনে দূরত্বের সঙ্গে সংকেতের ক্ষীণ হওয়া।

বেতার দিগন্ত

সবচেয়ে দূরের সেই দূরত্ব, যেখানে অ্যান্টেনা ও বিমানের মধ্যের
সরলরেখা পৃথিবীকে এড়িয়ে যায়।

SDR

Software-defined radio: একটি টিউনার যা কাঁচা সংকেতের
নমুনা ডিকোড করার জন্য কম্পিউটারের হাতে তুলে দেয়।

SSR

Secondary surveillance radar: মাটি জিজ্ঞাসা করে,
ট্রান্সপন্ডার উত্তর দেয়।

ট্রান্সপন্ডার

বিমানের সেই রেডিও যা রাডারকে উত্তর দেয় ও 1090 MHz-এ
ADS-B সম্প্রচার করে।

তরঙ্গদৈর্ঘ্য

একটি তরঙ্গের পরপর দুটি চূড়ার মধ্যের দূরত্ব: c / f , 1090
MHz-এ 27.5 cm।

এরপর

তত্ত্ব থেকে অনুশীলনে: রিসিভারটি বানান

বারোটি অধ্যায় এমন একটি ব্যবস্থা ব্যাখ্যা করেছে, যা আপনি এখন হাতে ধরতে পারেন। হাতে-কলমে কর্মশালা সেগুলোকে
এক বিকেলের কাজে পরিণত করে: 100 থেকে 150 ইউরোয় কী কিনবেন, অ্যান্টেনা কীভাবে বানাবেন ও বসাবেন, একটি
Raspberry Pi কীভাবে তৈরি করবেন ও Dataero ফিডার ইনস্টল করবেন, আর আপনি যে বিমানগুলো শোনেন সেগুলো
কীভাবে লাইভ মানচিত্রে ফুটে উঠতে দেখবেন, আপনার স্টেশনের নামে। উপরের প্রতিটি অধ্যায়ের জন্য সেখানে একটি
পরিমাপ অপেক্ষা করছে: বাস্তব বিমানের বিপরীতে বেতার দিগন্ত, সংকেতের কলামে বিপরীত বর্গ সূত্র, আকাশের দৈনিক
ছন্দ।

হাতে-কলমে কর্মশালা খুলুন <https://radar.dataero.eu/bn/learning/workshop>