

12 থেকে 18 বছর - শিক্ষকের জন্য

আকাশ ডিকোড করা: একটি বাস্তব ব্যবস্থার মধ্য দিয়ে পদার্থবিজ্ঞান ও কম্পিউটিং

পাঁচটি পাঠ ও একটি প্রকল্প। প্রতিটি পাঠ ADS-B-এর একটি অংশ নেয় আর তার পেছনের পদার্থবিজ্ঞান বা কম্পিউটিং পুরোপুরি গড়ে তোলে: যেখানে ক্লাস অনুসরণ করতে পারে সেখানে প্রতিপাদন, বাস্তব সংখ্যা দিয়ে সমাধান করা উদাহরণ, যে প্রদর্শনীগুলো ধারণাকে পর্যবেক্ষণযোগ্য করে, আর যেসব জায়গায় শিক্ষার্থীদের সহজাত ধারণা ভুল পথে যায়। পরিসরের ছোট প্রান্ত (12 থেকে 14) ধারণা ও অঙ্ক অনুসরণ করে; বড় প্রান্ত (15 থেকে 18) প্রতিপাদন অনুসরণ করে ও প্রকল্প চালায়।

শিখুন - <https://radar.dataero.eu/bn/learning/ages-12-18> 2026-10-22

সূচিপত্র

শুরুর আগে: একটি বাস্তব ব্যবস্থা কেন পাঁচটি পাঠের যোগ্য

পাঠ 1 - পদার্থবিজ্ঞান তরঙ্গ ও তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালি: বার্তা কীসে চড়ে যায়

পাঠ 2 - পদার্থবিজ্ঞান ও গণিত সময় ও অবস্থান: বিমান কীভাবে জানে সে কোথায়, আর যে বলে না তাকে নেটওয়ার্ক কীভাবে খোঁজে

পাঠ 3 - কম্পিউটিং ডিজিটাল বার্তা: 112 বিট, কীভাবে পাঠানো হয়, আর ক্রটি কীভাবে ধরা পড়ে

পাঠ 4 - পদার্থবিজ্ঞান বিস্তার ও পাল্লা: পৃথিবীর বাঁক ও বিপরীত বর্গ সূত্র

পাঠ 5 - পদার্থবিজ্ঞান ও প্রকৌশল অ্যান্টেনা ও রিসিভার: 27-সেন্টিমিটারের একটি তরঙ্গ থেকে মানচিত্রের একটি বিন্দু

প্রকল্প - দুই থেকে চার সপ্তাহ একটি রিসিভার বানান আর পদার্থবিজ্ঞানকে আকাশের বিপরীতে পরীক্ষা করুন

শিক্ষার্থীর চ্যালেঞ্জগুলোর উত্তর

এরপর প্রকল্পটি, ধাপে ধাপে

শুরুর আগে: একটি বাস্তব ব্যবস্থা কেন পাঁচটি পাঠের যোগ্য

12 থেকে 18 বছরে যে পদার্থবিজ্ঞান শেখানো হয় তার বেশিরভাগ শেখানো হয় টুকরো টুকরো করে: এখানে তরঙ্গের একটি একক, ওখানে তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালির একটি, কম্পিউটিংয়ে ডিজিটাল ডেটার একটি বিষয়, ভূগোলে উপগ্রহের একটি উল্লেখ। ADS-B একটি একক চালু ব্যবস্থা, যেখানে ওই সব টুকরো একসঙ্গে তার বহন করে, আর যেখানে ক্লাস একটি পাঠ্যবইয়ের চেয়ে কম দামের রিসিভার দিয়ে ফল পর্যবেক্ষণ করতে পারে। একটি বিমান উপগ্রহ থেকে আসা বেতার সংকেতের সময় মেপে তার অবস্থান নির্ণয় করে, যা ট্রাইল্যাটারেশন (trilateration) ও আলোর গতি। সে ফলটিকে একটি সাইক্লিক রিডানড্যান্সি চেকসহ 112 বিটে এনকোড করে, যা বাইনারি কোডিং ও ক্রটি শনাক্তকরণ। সে সেগুলো 1090 MHz-এ পালস-পজিশন-মড্যুলেটেড বেতার তরঙ্গ হিসেবে সম্প্রচার করে, যা বর্ণালি, কম্পাঙ্ক ও তরঙ্গদৈর্ঘ্য। তরঙ্গটি রিসিভারে পৌঁছায় কেবল পৃথিবীর বাঁক এড়িয়ে যাওয়া একটি সরলরেখা বরাবর, আর পৌঁছায় দূরত্বের বিপরীত বর্গ অনুপাতে দুর্বল হয়ে, যা জ্যামিতি ও শক্তি। এক-চতুর্থাংশ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের একটি সুর-বাঁধা অ্যান্টেনা একে প্রবাহে রূপান্তর করে, যা অনুনাদ। আর রিসিভারের একটি নেটওয়ার্ক পৌঁছানোর সময়ের পার্থক্য থেকে একটি নীরব ট্রান্সমিটারকেও খুঁজে বের করতে পারে, যা উপগ্রহ সমস্যাটি উল্টে দেওয়া। নিচের প্রতিটি পাঠ এর একটি নিয়ে তাকে নিজের মতো করে গড়ে তোলে, যেখানে ADS-B অলংকার নয়, চলমান উদাহরণ।

মূল পাতার রেফারেন্স কোর্স পুরো ব্যবস্থাটি বর্ণনামূলক আকারে দেয়, আর ক্লাসের উচিত পাঠ 3-এর আগে তার অধ্যায় 3 ও 5 এবং পাঠ 4 ও 5-এর আগে অধ্যায় 6 থেকে 8 পড়া; এর শব্দকোষ একটি কাজের হ্যান্ডআউট। এই পাতা ধরে নেয় আপনি তা পড়েছেন আর মনোযোগ দেয় পদার্থবিজ্ঞান ও শেখানোয়। সংখ্যাগত রীতি পুরো সময় একই: $c = 3.00 \times 10^8$ m/s, $f = 1090$ MHz, উচ্চতা মিটারে, দূরত্ব কিলোমিটারে, আর ক্রুজে থাকা বিমানকে ধরা হয়েছে 11 000 m-এ (ফ্লাইট লেভেল 360) ও 250 m/s গতিতে, যদি না উদাহরণে অন্য কিছু বলা থাকে।

সহজাত ধারণা নিয়ে দুটি সতর্কবার্তা। শিক্ষার্থীরা আসে এই বিশ্বাস নিয়ে যে বেতার তরঙ্গ এক ধরনের শব্দ আর "রাদার" বা "উপগ্রহ" বিমান দেখে। দুটিই ভুল, দুটিই পাঠ 1 ও 2-এ স্পষ্টভাবে সামলানো হয়েছে, আর দুটিই আবার ফিরে আসবে; কোর্সটি এমনভাবে নকশা করা যাতে পরের প্রতিটি পাঠ আপনাকে সেগুলো শোধরানোর একটি নতুন কারণ দেয়। আর যে শিক্ষার্থীরা সূত্রে স্বচ্ছন্দ, তারা প্রায়ই মাত্রায় স্বচ্ছন্দ নয়: কোর্সটি প্রতিটি ধাপে "ওটা কত বড়?" জিজ্ঞেস করার উপর ভারী ভর দেয়, কারণ প্রতি মাইক্রোসেকেন্ডে 300 m, 145 dB পথ ক্ষয় আর 2^{24} ঠিকানা, এগুলোই সেই সংখ্যা যা পদার্থবিজ্ঞানকে বাস্তব মনে করায়।

পাঠ 1 - পদার্থবিজ্ঞান

তরঙ্গ ও তড়িৎচুম্বকীয় বর্ণালি: বার্তা কীসে চড়ে যায়

পুরো কোর্স যে পর্যবেক্ষণের উপর দাঁড়িয়ে তা দিয়ে শুরু করুন: একটি বিমানের বেতার বার্তা ও একটি আলোকরশ্মি একই ভৌত ঘটনা। দুটিই তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ (electromagnetic wave), দোলায়মান বৈদ্যুতিক ও চৌম্বক ক্ষেত্র, যা কোনো মাধ্যম ছাড়াই মহাশূন্যের মধ্য দিয়ে বিস্তার লাভ করে, এমন একটি গতি c -তে যা শূন্যস্থানে প্রতিটি কম্পাঙ্কের জন্য একই আর বাতাসে প্রায় তা-ই: 299 792 458 m/s, যা ক্লাস 3.00×10^8 m/s ধরতে পারে। যে রাশি বেতারকে দৃশ্যমান আলো থেকে, আর দৃশ্যমান আলোকে X-রশ্মি থেকে আলাদা করে তা কেবল দোলনের কম্পাঙ্ক f । আমাদের রেটিনা প্রায় 4×10^{14} থেকে 8×10^{14} Hz-এর মধ্যের কম্পাঙ্কে সাড়া দেয়, যা আমরা লাল থেকে বেগুনি হিসেবে অনুভব করি; ADS-B সম্প্রচারিত হয় 1.09×10^9 Hz-এ, মোটামুটি আধা মিলিয়ন গুণ কম। তরঙ্গের কিছুই ধরনে আলাদা নয়; কেবল আমাদের চোখ বাছাই করে।

ক্লাসের জন্য তরঙ্গ সমীকরণটি বলে দেওয়ার বদলে প্রতিপাদন করুন। একটি তরঙ্গ যদি c গতিতে চলে ও প্রতি সেকেন্ডে f বার দোলে, তাহলে এক সেকেন্ডে এটি c দূরত্ব এগিয়েছে ও f -টি সম্পূর্ণ চক্র তৈরি করেছে; তাই প্রতিটি চক্র দখল করে c / f দৈর্ঘ্য। সেই দৈর্ঘ্যই তরঙ্গদৈর্ঘ্য, λ , আর তাই $c = f \times \lambda$ । ADS-B-তে প্রয়োগ করলে: $\lambda = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275$ m। বিমান ও রিসিভারের মধ্যের বার্তার চূড়াগুলো 27.5 cm দূরে দূরে। ক্লাসকে তা তাদের নিজেদের আঁকা একটি বর্ণালিতে বসাতে দিন, লগারিদমিক অক্ষে: FM সম্প্রচার 100 MHz ও 3 m-এ, ADS-B 1 090 MHz ও 27.5 cm-এ, মোবাইল ফোন 1 800 MHz ও 17 cm-এ, Wi-Fi ও মাইক্রোওয়েভ ওভেন 2 450 MHz ও 12 cm-এ, অবলোহিত, দৃশ্যমান আলো 5.6×10^{14} Hz ও 540 nm-এ, আর এভাবে X-রশ্মি পর্যন্ত। বিমানের তরঙ্গকে একটি ফোন ও একটি ওভেনের মাঝে বসানোর অনুশীলনটি যেকোনো টেবিলের চেয়ে বেশি মূল্যবান, কারণ এটি বুঝিয়ে দেয় এরা প্রতিবেশী।

এবার শব্দের বিভ্রান্তিকে সরাসরি মোকাবিলা করুন, কারণ এটি সর্বজনীন আর কারণ তুলনাটি দুটি ঘটনাই শেখায়। শব্দ একটি মাধ্যমে অনুদৈর্ঘ্য চাপ-তরঙ্গ; এর গতি মাধ্যমের ধর্ম, 20 ডিগ্রিতে বাতাসে 343 m/s, পানিতে প্রায় 1 500 m/s, আর শূন্যস্থানে শূন্য। বেতার একটি অনুপ্রস্থ তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ, যার কোনো মাধ্যমই লাগে না, শূন্যস্থানে c গতিতে আর বাতাসে অনুভবের অযোগ্য পরিমাণে ধীরে চলে। ফাঁকটিতে একটি সংখ্যা বসান: 3.00×10^8 ভাগ 343 প্রায় 875 000। 30 km দূরের একটি বিমান একই মুহূর্তে একটি শব্দ ও একটি বার্তা ছাড়লে বার্তাটি পৌঁছে দেয় 100 মাইক্রোসেকেন্ডে আর শব্দটি 87 সেকেন্ডে; শব্দ পৌঁছানোর মধ্যে বিমান 22 km উড়ে গেছে। প্রদর্শনী হলো ক্লাসরুমে একটি দড়ি আর খেলার মাঠ জুড়ে একটি

টর্চ: দড়ির তরঙ্গের দৃশ্যতই দড়ি লাগে আর দড়ি যে গতি ঠিক করে সেই গতিতে চলে, আর টর্চের ঝলক দূর প্রান্তে পৌঁছায় এমন কোনো দেরি ছাড়াই যা কেউ মাপতে পারে। স্পষ্টভাবে তালিকা করুন দড়ির সঙ্গে আলোর কী মিল (একটি তরঙ্গ, একটি তরঙ্গদৈর্ঘ্য, একটি কম্পাঙ্ক, একটি নির্দিষ্ট গতি আর তাই f ও λ -র মধ্যে বিপরীত সম্পর্ক) আর কী নয় (একটি মাধ্যম, প্রতি সেকেন্ডে মিটারের গতি)।

শেষ করুন সমবর্তন (polarisation) দিয়ে, যা দেখানো সস্তা আর পাঠ 5-এ ফল দেয়। একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গের বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র তার চলার দিকের সঙ্গে লম্ব একটি নির্দিষ্ট দিকে দোলে। বিমানের ট্রান্সপন্ডার অ্যান্টেনা খাড়া, তাই ADS-B তরঙ্গ খাড়াভাবে সমবর্তিত; গ্রহণকারী অ্যান্টেনাকেও খাড়া হতে হয়, আর অনুভূমিক করে দিলে সে প্রায় কিছুই শোনে না। খাড়াভাবে ঝাঁকানো দড়ির তরঙ্গ একটি কার্ডবোর্ড বাক্সের খাড়া ফাঁক দিয়ে যায় আর অনুভূমিক ফাঁকে আটকে যায়; জানালার সামনে আড়াআড়ি রাখা দুই টুকরো সমবর্তক ফিল্ম (সস্তা 3D চশমা থেকে) আলোর জন্য একই জিনিস দেখায়। ক্লাসকে অনুমান করতে বলুন একটি গ্রহণকারী অ্যান্টেনা শুইয়ে দিলে গ্রহণের কী হবে। তারা প্রকল্পে অনুমানটি পরীক্ষা করবে।

দেওয়ার মতো সমাধান করা উদাহরণ

দ্বিতীয় ADS-B ব্যবস্থা, যা যুক্তরাষ্ট্রে হালকা বিমান ব্যবহার করে, 978 MHz-এ সম্প্রচার করে। এর তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত, আর এর জন্য একটি চতুর্থাংশ-তরঙ্গ অ্যান্টেনা কত লম্বা হবে? (0.307 m; 7.7 cm) যে শিক্ষার্থী এটি পারে, পাঠ 1 তার আয়ত্তে।

পাঠ 2 - পদার্থবিজ্ঞান ও গণিত

সময় ও অবস্থান: বিমান কীভাবে জানে সে কোথায়, আর যে বলে না তাকে নেটওয়ার্ক কীভাবে খোঁজে

বিমান তার অবস্থান নিয়ে যা কিছু সম্প্রচার করে তার সবই আসে উপগ্রহ নেভিগেশন থেকে, আর উপগ্রহ নেভিগেশন, মূলে, সময়ের একটি পরিমাপ। প্রতিটি GNSS উপগ্রহ, প্রায় 20 200 km-এ প্রদক্ষিণরত, একটি পারমাণবিক ঘড়ি বহন করে আর এমন একটি সংকেত পাঠায় যা তার নিজের অবস্থান ও সম্প্রচারের সঠিক মুহূর্ত জানায়। একটি রিসিভার পৌঁছানোর মুহূর্ত লিখে রাখে। পার্থক্যকে c দিয়ে গুণ করলে সেই উপগ্রহের দূরত্ব, আর এমন একটি দূরত্ব রিসিভারকে বসায় উপগ্রহকে কেন্দ্র করে সেই ব্যাসার্ধের একটি গোলকের উপর। ক্লাসকে গণনাগুলো প্রতিপাদন করতে দিন: দুটি গোলক ছেদ করে একটি বৃত্তে, তিনটি দুটি বিন্দুতে, যার একটি পৃথিবীর পৃষ্ঠ থেকে বহু দূরে আর বাদ দেওয়া যায়। তাই তিনটি উপগ্রহই যথেষ্ট, রিসিভারে একটি নিখুঁত ঘড়ি থাকলে। তার সে রকম কিছুই নেই; একটি কোয়ার্টজ দোলক প্রয়োজনীয় ন্যানোসেকেন্ডের চেয়ে অনেক বেশি সরে যায়। সমাধানটি, যা বিষয়টির চমৎকার প্রাণ, হলো রিসিভারের ঘড়ির ত্রুটিতে চতুর্থ অজানা রাশি হিসেবে ধরা ও চতুর্থ একটি উপগ্রহ ব্যবহার করা: চারটি অজানায় (x , y , z ও ঘড়ির অফসেট) চারটি সমীকরণ, অবিরাম সমাধান করা। তাই একটি GNSS রিসিভারের দৃষ্টিসীমায় চারটি উপগ্রহ লাগে, আর উপজাত হিসেবে এটি কয়েক দশ ন্যানোসেকেন্ডের মধ্যে সময় রাখে, এ কারণেই পাঠ 5-এর নেটওয়ার্কের রিসিভারগুলো তাদের ঘড়ির জন্য বিমানের মতো একই উপগ্রহ ব্যবহার করে।

মাত্রাগুলো বোর্ডে রাখুন আর বারবার সেগুলোয় ফিরুন। আলো এক ন্যানোসেকেন্ডে 0.300 m আর এক মাইক্রোসেকেন্ডে 300 m যায়। 1 মাইক্রোসেকেন্ডের সময়-ত্রুটি হলো 300 m-এর দূরত্ব-ত্রুটি; একটি আধুনিক রিসিভারের কয়েক মিটারের নির্ভুলতা দশ ন্যানোসেকেন্ড স্তরের সময় মাপার সমান। ঠিক মাথার উপরের একটি উপগ্রহ থেকে যাত্রাকাল $20\,200\text{ km} / 3.00 \times 10^8\text{ km/s} = 0.0673\text{ s}$, আর দিগন্তের কাছের একটি থেকে প্রায় 0.086 s , তাই রিসিভার কয়েক মিলিসেকেন্ডের

পার্থক্য মাপছে তার দশ কোটি ভাগের এক ভাগ নির্ভুলতায়। ক্লাসকে জিজ্ঞেস করুন একটি উপগ্রহের ঘড়ি এক মাইক্রোসেকেন্ড এগিয়ে থাকলে কী হতো; তাদের দেখা উচিত যে এটি ব্যবহার করা প্রতিটি রিসিভার তার দিকের রেখা বরাবর প্রায় 300 m ঠেলে সরে যেত, আর এ কারণেই উপগ্রহের ঘড়িগুলো মাটি থেকে দিনে কয়েকবার শোধরানো হয়।

দুটি উচ্চতাকে আলাদা করুন, কারণ বার্তা দুটিই বহন করে আর শিক্ষার্থীরা সবসময় জিজ্ঞেস করে। উপগ্রহের সমাধান দেয় পৃথিবীর রেফারেন্স উপবৃত্তের উপরে একটি জ্যামিতিক উচ্চতা। তবু বিমান জানায় ব্যারোমিটারের উচ্চতা: ফিউজেলাজের বাইরের স্থির চাপকে আন্তর্জাতিক আদর্শ বায়ুমণ্ডল (International Standard Atmosphere) দিয়ে উচ্চতায় রূপান্তর করে, যা সমুদ্রপৃষ্ঠে 1013.25 hPa ও 15 ডিগ্রি আর প্রতি কিলোমিটারে 6.5 ডিগ্রি হ্রাস ধরে নেয়। যেদিন প্রকৃত চাপ আদর্শ থেকে আলাদা, প্রতিটি বিমানের ব্যারোমিটারের উচ্চতা একই পরিমাণে ভুল হয়, আর দূরত্ব বজায় রাখার ঠিক এটিই দরকার: ফ্লাইট লেভেল 350 ও 360 পড়া দুটি বিমান আবহাওয়া যা-ই হোক 1 000 ft দূরে। ADS-B অবস্থান-বার্তা 25-ফুট ধাপে ব্যারোমিটারের উচ্চতা বহন করে; বেগ-বার্তা বহন করে ব্যারোমিটারের ও জ্যামিতিক উচ্চতার পার্থক্য, তাই একটি রিসিভার দুটিই পুনরুদ্ধার করতে পারে। বড় দলের জন্য ISA সম্পর্ক $p = p_0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^{5.255}$ একটি ভালো স্প্রেডশিট অনুশীলন: এটি উল্টে p থেকে h বের করুন আর যাচাই করুন যে 11 000 m-এর মানে প্রায় 227 hPa, সমুদ্রপৃষ্ঠের চাপের এক-পঞ্চমাংশ।

এবার সমস্যাটিকে উল্টে দিন। কিছু বিমান উপগ্রহ-অবস্থান ছাড়াই 1090 MHz-এ সম্প্রচার করে: পুরোনো ট্রান্সপন্ডার যা রাডারকে কেবল পরিচয় ও উচ্চতা দিয়ে উত্তর দেয়, বা এমন বিমান যার GNSS জ্যাম করা। রিসিভারের একটি নেটওয়ার্ক তবু তাদের খুঁজে বের করতে পারে। ধরুন, মেলানো ঘড়িসহ চারটি রিসিভার একই সম্প্রচারের পৌঁছানোর সময় লিখে রাখে। ট্রান্সমিটার অজানা, রিসিভারগুলো জানা: এটি GNSS সমস্যা, জানা ও অজানার ভূমিকা বদলে। যে বার্তা রিসিভার B-এর এক মাইক্রোসেকেন্ড আগে রিসিভার A-তে পৌঁছেছে তা পাঠানো হয়েছে B-এর চেয়ে A-এর 300 m কাছের একটি বিন্দু থেকে, আর এমন বিন্দুর সঞ্চারণপথ হলো A ও B-কে নাভি করে একটি হাইপারবোলয়েড। চারটি রিসিভার থেকে তিনটি স্বাধীন জোড়া তিনটি হাইপারবোলয়েড দেয়, যাদের ছেদ বিমানটি। এটিই মাল্টিলাটারেশন (multilateration), আর এর জন্য রিসিভারগুলোর ঘড়ি প্রায় 100 ns-এর মধ্যে মিলতে হয়, যা তারা উপগ্রহ থেকে পায়। ক্লাসের জন্য একে খেলার মাঠের অনুশীলন দিয়ে দুই মাত্রায় নামিয়ে আনুন: জরিপ করা বিন্দুতে স্টপওয়াচসহ তিনজন শিক্ষার্থী, কোথাও লুকানো চতুর্থ একজন হাততালি দেয়, তিনজন তাদের প্রতিক্রিয়া-সময় শোধরানো দেয় লিখে রাখে, আর ক্লাস 343 m/s ব্যবহার করে হাইপারবোলা আঁকে (বা, আরও সহজে, একটি স্কেল-চিত্রে পরীক্ষামূলক অবস্থান ব্যবহার করে) হাততালি-দাতাকে খুঁজতে। তারপর জিজ্ঞেস করুন 200 km-এর উপর বেতার দিয়ে একই কাজ করতে সময়-নির্ভুলতা কত হতে হতো, আর তাদের একটি স্টপওয়াচ ও একটি পারমাণবিক ঘড়ির মধ্যের ফাঁকটি অনুভব করতে দিন।

দেওয়ার মতো সমাধান করা উদাহরণ

60 km দূরে দূরে দুটি রিসিভার একটি বার্তা 50 মাইক্রোসেকেন্ড ব্যবধানে লিখে রাখে। বিমানটি প্রথম রিসিভারের কতটা কাছে ছিল? (15 km।) ঘড়ি দুটি পরস্পরের তুলনায় 1 মাইক্রোসেকেন্ড ভুল হলে উত্তরে কত ক্রটি ঢুকত? (300 m।) যে শিক্ষার্থী ব্যাখ্যা করতে পারে দ্বিতীয় উত্তরটি কেন দূরত্বের উপর নির্ভর করে না, সে বুঝেছে মাল্টিলাটারেশন কী দাবি করে।

পাঠ 3 - কম্পিউটিং

ডিজিটাল বার্তা: 112 বিট, কীভাবে পাঠানো হয়, আর ক্রটি কীভাবে ধরা পড়ে

বিমানের ট্রান্সপন্ডার তার ADS-B ডেটা পাঠায় একটি Mode S এক্সটেন্ডেড স্কুইটার (extended squitter) হিসেবে: একটি 8-মাইক্রোসেকেন্ডের প্রিঅ্যাম্বল (preamble), তারপর 112টি ডেটা বিট, ঠিক প্রতি মাইক্রোসেকেন্ডে এক বিট। পাঠটি প্রিঅ্যাম্বল দিয়ে শুরু করুন, কারণ এটি এমন একটি প্রশ্নের উত্তর দেয় যা শিক্ষার্থীরা এখনো করার কথা ভাবেনি: চ্যানেল যখন গোলমালে ও অন্য বিমানে ভরা, একটি রিসিভার কী করে জানে একটি বার্তা শুরু হয়েছে? প্রিঅ্যাম্বল হলো 0, 1, 3.5 ও 4.5 মাইক্রোসেকেন্ডে চারটি পালসের একটি নির্দিষ্ট নকশা। একটি ডিকোডার অবিরাম সেই নকশা খোঁজে; পেলে সে জানে একটি বার্তা আসছে আর ঠিক কখন প্রতিটি বিট-ঘর শুরু হয়। শিক্ষার্থীরা যত ডিজিটাল প্রোটোকলের সঙ্গে পরিচিত, Wi-Fi থেকে QR কোড, তার প্রতিটিরই এর সমতুল্য কিছু আছে, আর তা বলার জন্য এটি একটি ভালো মুহূর্ত।

তারপর মডুলেশন। একটি রেডিও চালু বা বন্ধ থাকতে পারে; 1 বা 0 কীভাবে পাঠান? ADS-B ব্যবহার করে পালস পজিশন মডুলেশন (pulse position modulation): এক মাইক্রোসেকেন্ডের প্রতিটি বিট-ঘর দুই অর্ধে ভাগ করা, আর প্রথম অর্ধে একটি পালস তারপর নীরবতা মানে 1, নীরবতা তারপর একটি পালস মানে 0। বোর্ডে কয়েকটি বিট পালস হিসেবে আঁকুন আর ক্লাসকে পড়তে দিন। তারপর জিজ্ঞেস করুন এটি "পালস মানে 1, পালস নেই মানে 0"-এর সহজ পদ্ধতির চেয়ে ভালো কেন। একটু উসকে দিলে দুটি কারণ বেরিয়ে আসে। প্রতি বিটে সবসময় ঠিক একটি পালস থাকে, তাই রিসিভার একটানা শূন্যের মধ্যেও তার সময় মিলিয়ে রাখতে পারে, আর সে প্রতিটি বিট ঠিক করতে পারে কোন অর্ধ বেশি জোরালো তা জিজ্ঞেস করে, একটি পালস কোনো পরম সীমা পার হলো কি না তা নয়, যা ডিকোডিংকে সংকেত ঘটনাচক্রে কতটা শক্তিশালী তার প্রতি অসংবেদনশীল করে। সরল পদ্ধতিতে একটানা অনেক শূন্য নীরবতা থেকে আলাদা করা যেত না; PPM-এ তা দ্বিতীয়-অর্ধ পালসের একটি স্থির ঢালের তাল।

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



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

এবার 112 বিটের বিন্যাস, যা পাঠের শেষে ক্লাসের মুখস্থ থেকে পুনরুৎপাদন করতে পারা উচিত। বিট 1 থেকে 5 ডাউনলিংক ফরম্যাট, ট্রান্সপন্ডার থেকে ADS-B-এর জন্য 17। বিট 6 থেকে 8 একটি সামর্থ্য কোড। বিট 9 থেকে 32 হলো 24-বিট ICAO ঠিকানা, বিমানের স্থায়ী পরিচয়। বিট 33 থেকে 88 হলো 56-বিট বার্তা ফিল্ড, যার প্রথম পাঁচ বিট, টাইপ কোড, বলে বাকি 51-এ কী আছে: একটি পরিচয়-বার্তা (টাইপ কোড 1 থেকে 4) আট-অক্ষরের কল সাইনকে আটটি 6-বিট অক্ষর হিসেবে বহন করে; একটি আকাশে-অবস্থান (9 থেকে 18) বহন করে ব্যারোমিটারের উচ্চতার 12 বিট, এটি জোড় না বিজোড় ফ্রেম তা বলা একটি ফ্ল্যাগ, আর এনকোড করা অক্ষাংশ ও দ্রাঘিমাংশের 17 বিট করে; একটি বেগ-বার্তা (19) বহন করে ভূমি-গতির পূর্ব-পশ্চিম ও উত্তর-দক্ষিণ উপাংশ, উল্লম্ব হার, আর ব্যারোমিটারের-জ্যামিতিক উচ্চতার পার্থক্য। বিট 89 থেকে 112 হলো 24-বিট প্যারিটি। অঙ্কগুলো দিন: 24 বিট ঠিকানা দেয় $2^{24} = 16\,777\,216$ টি বিমান; আটটি 6-বিট অক্ষর প্রতিটিতে 64টি প্রতীক অনুমোদন করে, অক্ষর, অঙ্ক ও ফাঁকার জন্য যথেষ্ট; 25-ফুট ধাপে 12 বিট উচ্চতা 102 400 ফুট ঢাকে; আর অক্ষাংশের 17 বিট, সরলভাবে 180 ডিগ্রির উপর ব্যবহার করলে, মাত্র 1.4 km পর্যন্ত আলাদা করত, যা সেই প্রশ্ন তোলে যার উত্তর কমপ্যাক্ট পজিশন রিপোর্টিং দেয়। CPR এক অনুচ্ছেদে ব্যাখ্যা করুন: 17 বিট একটি অক্ষরের

মধ্যে কয়েক মিটার পর্যন্ত অবস্থান দেয়, কোন অঞ্চল তা নয়; বিমান পালা করে দুটি অঞ্চল-জাল ব্যবহার করে, জোড় ও বিজোড়, আর যে রিসিভারের কাছে প্রতিটির একটি আছে সে অঞ্চলটি দৃথ্যহীনভাবে বের করতে পারে আর তারপর একক বার্তা থেকে ট্রাক করতে পারে। সময় ব্যবহার করে একই বিট থেকে বেশি নির্ভুলতা পাওয়ার এটি একটি চমৎকার উদাহরণ।

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)

ক্লাসকে একটি বাস্তব বার্তা দিন আর তাদের ব্যবচ্ছেদ করতে দিন। হেক্সাডেসিমাল স্ট্রিং 8D4840D6202CC371C32CE0576098 হলো 28টি হেক্স অঙ্ক, 112 বিট। প্রথম দুটি অঙ্ক, 8D, বাইনারিতে রূপান্তর করলে 10001 101: DF = 17, CA = 5। পরের ছয়টি অঙ্ক, 4840D6, হলো ICAO ঠিকানা, যা বরাদ্দ তালিকা নেদারল্যান্ডসকে দেয়। তার পরের অঙ্কগুলো, 20 ..., শুরু হয় 00100 দিয়ে, টাইপ কোড 4, একটি পরিচয়-বার্তা, আর তার পরের 6-বিট অঙ্কগুলো ডিকোড করলে পাওয়া যায় কল সাইন KLM1023। শেষ ছয়টি অঙ্ক, 576098, হলো প্যারিটি। একটি স্প্রেডশিট বা কয়েক লাইন Python-সহ একটি ক্লাস এক পাঠেই পুরো ডিকোডটি করতে পারে, আর একটি হেক্স স্ট্রিং নিয়ে "ওটা একটি KLM বিমান, তার ফ্লাইট নম্বর ঘোষণা করছে" বলতে পারাই লক্ষ্য করার মতো ফল।

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: ডাউনলিংক ফরম্যাট 17, সামর্থ্য 5। 4840D6: ICAO ঠিকানা, নেদারল্যান্ডসকে বরাদ্দ। 20...: টাইপ কোড 4, পরিচয়, কল সাইন KLM1023। 576098: 24-বিট প্যারিটি।

প্যারিটি দিয়ে শেষ করুন, কারণ এটিই সবচেয়ে গড়ে তোলার মতো কম্পিউটিং ধারণা। একটি ব্যস্ত বিমানবন্দরের উপরে বিভিন্ন বিমানের বার্তা একটি রিসিভারে অবিরাম একে অপরের উপর পড়ে, আর পালস গোলমালেও হারায়; একটি ডিকোডার অনিবার্যভাবে ভুল বিট জোড়া লাগাবে। শেষের 24-বিট ফিল্ডটি একটি সাইক্লিক রিডানড্যান্সি চেক (cyclic redundancy check): 88টি বার্তা-বিটকে একটি লম্বা বাইনারি সংখ্যা হিসেবে ধরে একটি নির্দিষ্ট 25-বিট জেনারেটর দিয়ে ভাগ করা হয়, একটি বিশেষ গণিতে যেখানে বিয়োগ হলো এক্সক্লুসিভ-অর; ভাগশেষটিই CRC। রিসিভার তার ডিকোড করা বিটগুলোর উপর ভাগটি আবার করে ও মেলায়। যেকোনো একটি নষ্ট বিট, যেকোনো দুটি, আর 24 বিট পর্যন্ত লম্বা যেকোনো গুচ্ছ ক্রটি ভাগশেষ বদলে দেয়, তাই নষ্ট বার্তা বাতিল হয়। ধারণাটি ছোট মাপে দেখান একটি 8-বিট বার্তার উপর হাতে করা 4-বিট CRC দিয়ে, বা বারকোডের চেক ডিজিটের সহজতর সাদৃশ্য দিয়ে; তারপর বড় দলকে আসল CRC-24 কয়েক লাইন কোডে বাস্তবায়ন করতে দিন আর যাচাই করতে দিন যে উদাহরণ বার্তার প্যারিটি ঠিক আসে, আর একটি বিট উল্টে দিলে তা ব্যর্থ হয়। এটিই ক্রটি শনাক্তকরণ, যেভাবে প্রতিটি আধুনিক ব্যবস্থা করে, এমন একটি প্রেক্ষাপটে দেখা যেখানে একটি ক্রটি ধরা না পড়লে একটি কন্ট্রোলারের পর্দায় একটি ভূত বিমান বসে যেতে পারত।

দেওয়ার মতো সমাধান করা উদাহরণ

একটি সম্পূর্ণ সম্প্রচার কতক্ষণ স্থায়ী হয়, আর একটি ট্রান্সপন্ডার প্রতি সেকেন্ডে 4.5টি এক্সটেন্ডেড স্কুইটার পাঠালে সময়ের কত ভগ্নাংশ সে ADS-B সম্প্রচার করে? (120 মাইক্রোসেকেন্ড; প্রতি সেকেন্ডে 540 মাইক্রোসেকেন্ড, 0.054 শতাংশ।) চ্যানেলে অন্য যা কিছু সম্প্রচারিত হয় তা উপেক্ষা করলে, নীতিগতভাবে কতগুলো বিমান চ্যানেলটি ভাগ করতে পারত তা অবিরাম ব্যস্ত হওয়ার আগে? (প্রায় 1 850, এ কারণেই সবচেয়ে ব্যস্ত আকাশসীমায় ভিড় একটি সত্যিকারের প্রকৌশল-দুশ্চিন্তা।)

পাঠ 4 - পদার্থবিজ্ঞান

বিস্তার ও পাল্লা: পৃথিবীর বাঁক ও বিপরীত বর্গ সূত্র

একটি রিসিভার কত দূর থেকে একটি বিমান শুনতে পারে? প্রশ্নটির দুটি স্বাধীন উত্তর আছে, জ্যামিতিক ও শক্তিগত, আর পাঠের উদ্দেশ্য দুটিই প্রতিপাদন করা ও আবিষ্কার করা যে নকশাকাররা সেগুলোকে মিলিয়ে দেওয়ার ব্যবস্থা করেছেন। প্রথমে জ্যামিতি। 1090 MHz-এ বেতার পৃথিবীকে ঘিরে কাজের মতো অপবর্তিত হয় না; এটি আলোর মতো আচরণ করে ও সরলরেখায় চলে। তাই একটি রিসিভার কেবল তার দিগন্তের উপরের বিমান শুনতে পারে, অর্থাৎ যে বিমান থেকে অ্যান্টেনা পর্যন্ত একটি সরলরেখা মাটির ভেতর দিয়ে যায় না। ক্লাসের সঙ্গে দিগন্তের দূরত্ব প্রতিপাদন করুন। R ব্যাসার্ধের একটি গোলকের উপরে h উচ্চতায় একটি অ্যান্টেনা দিগন্ত দেখে যেখানে তার দৃষ্টিরেখা গোলকের স্পর্শক, স্পর্শবিন্দু পর্যন্ত ব্যাসার্ধ আর অ্যান্টেনা পর্যন্ত ব্যাসার্ধ স্পর্শবিন্দুতে একটি সমকোণ তৈরি করে, তাই পিথাগোরাস অনুযায়ী $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, যা দেয় $d^2 = 2Rh + h^2$ । R-এর তুলনায় h যেহেতু নগণ্য, $d = \sqrt{2Rh}$ । $R = 6\,371\text{ km}$ ও h মিটারে নিয়ে, কিলোমিটারে $d = \sqrt{2 \times 6371 \times h / 1000} = 3.57 \sqrt{h}$ । বায়ুমণ্ডলের ঘনত্ব, আর তাই তার প্রতিসরাঙ্ক, উচ্চতার সঙ্গে কমে, যা বেতার রশ্মিকে সামান্য নিচের দিকে বাঁকায়; আদর্শ সংশোধন পৃথিবীকে এমনভাবে ধরে যেন তার ব্যাসার্ধ প্রকৃতির চার-তৃতীয়াংশ, 3.57-এর বদলে 4.12 বসিয়ে। h1-এ একটি অ্যান্টেনা থেকে h2-এ একটি বিমান পর্যন্ত পূর্ণ দৃষ্টিরেখা হলো দুটি দিগন্ত-দূরত্বের যোগফল:

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

20 m ছাদে অ্যান্টেনা, বিমান 11 000 m-এ: $4.12 \times (4.47 + 104.9) = 451\text{ km}$ । একই অ্যান্টেনা, বিমান 1 000 m-এ: $4.12 \times (4.47 + 31.6) = 149\text{ km}$ । 30 km দূরের রানওয়েতে বিমান: $4.12 \times (4.47 + 2) = 27\text{ km}$, তাই শোনা যায় না।



ক্লাসকে তাদের নিজেদের স্কুলের অ্যান্টেনার উচ্চতার জন্য h2-এর বিপরীতে d-এর লেখচিত্র আঁকতে দিন; বক্ররেখাটি, প্রথমে খাড়া ও তারপর সমতল হয়ে আসা, প্রতিটি রিসিভারের কভারেজের আকৃতি ব্যাখ্যা করে: ক্রুজিং ট্রাফিকের জন্য 400 km ও তার বেশি ব্যাসার্ধের একটি বৃত্ত, অবতরণের পথে থাকা বিমানের জন্য কয়েক দশ কিলোমিটার, আর মাটিতে পাশের বিমানবন্দর ছাড়া কিছুই নয়। এটি আরও ব্যাখ্যা করে কেন উচ্চতা একটি রিসিভারের অন্য যেকোনো ধর্মের চেয়ে বেশি গুরুত্বপূর্ণ, আর কেন আপনার ও বিমানবন্দরের মাঝের একটি পাহাড়, বা বিমানের নিজের ডানা যখন সে দূরে কাত হয়, একটি ট্র্যাক মুহুর্তে কেটে দেয়। প্রাথমিক কোর্সের খেলার মাঠের প্রদর্শনী, উবু হওয়ার চেয়ে বেঞ্চ থেকে দূরে দেখা, এই বয়সের জন্য ছোট নয় যদি আপনি এর পরে প্রতিপাদনটি আনেন; কথা হলো এখন তারা জানে কেন।

এবার শক্তি। একটি ট্রান্সপন্ডার কয়েকশ ওয়াটের সর্বোচ্চ শক্তি বিকিরণ করে, মোটামুটি সমানভাবে সব অনুভূমিক দিকে। d দূরত্বে সেই শক্তি $4\pi d^2$ ক্ষেত্রফলের একটি গোলকের উপর ছড়িয়েছে, তাই নির্দিষ্ট কার্যকর ক্ষেত্রফলের একটি অ্যান্টেনায় ধরা পড়া শক্তি $1/d^2$ হারে কমে: বিপরীত বর্গ সূত্র (inverse square law), যা ক্লাসের মুখস্থ করার বদলে গোলকের ক্ষেত্রফল থেকে প্রতিপাদন করা উচিত। দ্বিগুণ দূরত্ব, এক-চতুর্থাংশ শক্তি; দশ গুণ, একশ ভাগের এক ভাগ। বেতার

প্রকৌশলীরা একটি আইসোট্রপিক ট্রান্সমিটার ও একটি আইসোট্রপিক রিসিভারের মধ্যের ক্ষয়কে ডেসিবেলে প্রকাশ করেন, আর আদর্শ সূত্রটি, যা বড় দল বিশ্বাসে নিতে পারে বা একটি অ্যান্টেনার কার্যকর ক্ষেত্রফল $\lambda^2 / 4\pi$ থেকে প্রতিপাদন করতে পারে, হলো:

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

400 km ও 1090 MHz-এ: $20 \times 2.60 + 20 \times 3.04 + 32.44 = 52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 \text{ dB}$ । একটি 250 W ট্রান্সমিটার হলো +54 dBm; গৃহীত শক্তি $54 - 145 = -91 \text{ dBm}$, প্রায় $8 \times 10^{-13} \text{ W}$, অর্থাৎ এক ওয়াটের মিলিয়নের মিলিয়ন ভাগের এক ভাগ।

ক্লাস ডেসিবেলের সঙ্গে পরিচিত না হলে এতে কয়েক মিনিট দিন, কারণ এটি চৌদ্দ মাত্রার পরিসরের একটি গুণকে যোগে পরিণত করে, আর কারণ সংখ্যাটি নিজেই শিক্ষণীয়: ছাদের একটি রিসিভার এমন একটি সংকেত শনাক্ত করছে যা বিমান থেকে বেরোনোর চেয়ে $10^{14.5}$ গুণ দুর্বল। একটি ভালো শখের রিসিভার প্রায় -100 dBm পর্যন্ত ডিকোড করতে পারে, তাই 400 km-এ হাতে প্রায় 9 dB থাকে, অর্থাৎ একটি ক্রুজিং যাত্রীবাহী বিমানের জন্য শক্তিগত সীমা ও জ্যামিতিক দিগন্ত একই জায়গায় পড়ে। এটি কোনো কাকতালীয় ঘটনা নয়; ট্রান্সপন্ডারের শক্তি ও রিসিভারের মান এমনভাবে নির্ধারিত হয়েছিল যাতে একটি বিমান দিগন্ত পর্যন্ত শোনা যায় আর তার বেশি খুব একটা নয়, যা পাশের দেশের সম্প্রচারে চ্যানেল ভেঙ্গে যাওয়া ঠেকায়।

বড় দলের জন্য দুটি পরিমার্জন। প্রথমত, ডপলার: 250 m/s গতিতে এগিয়ে আসা একটি বিমান গৃহীত কম্পাঙ্কে $f \times v / c = 1.09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908 \text{ Hz}$ সরিয়ে দেয়, বাহক কম্পাঙ্কের মিলিয়ন ভাগের এক ভাগেরও কম, যা একটি রিসিভার কখনো লক্ষ করে না; এর সঙ্গে তুলনা করুন বিমানের শব্দের শ্রবণযোগ্য ডপলার সরণ, যেখানে v / c হলো $250 / 343$ আর সে পার হওয়ার সময় সুর প্রায় এক অষ্টক বদলে যায়। দ্বিতীয়ত, সংকেতের যাত্রাকাল: c গতিতে 400 km লাগে 1.33 ms, তাই বার্তার অবস্থানটি ইতিমধ্যেই 1.33 ms পুরোনো, যার মধ্যে বিমান 33 cm সরেছে; একটি মানচিত্রের জন্য নগণ্য, পাঠ 2-এর মাল্টিপ্যাটারেশনের জন্য নির্ণায়ক, যা ঠিক এই মাইক্রোসেকেন্ডগুলোর উপরেই বাঁচে।

দেওয়ার মতো সমাধান করা উদাহরণ

10 m মাস্তুলে একটি রিসিভার 11 000 m-এ একটি ক্রুজিং বিমান শোনে কিন্তু 130 km দূরে 600 m-এ একটি হালকা বিমান শোনে না। হালকা বিমানটি কি দিগন্তের নিচে? (দিগন্ত: $4.12 \times (3.16 + 24.5) = 114 \text{ km}$, তাই হ্যাঁ!) তাকে শুনতে রিসিভারকে কত উঁচুতে থাকতে হতো? (দরকার $4.12 \times (\sqrt{h_1} + 24.5) = 130$, তাই $\sqrt{h_1} = 7.05$, $h_1 = 50 \text{ m}$)

পাঠ 5 - পদার্থবিজ্ঞান ও প্রকৌশল

অ্যান্টেনা ও রিসিভার: 27-সেন্টিমিটারের একটি তরঙ্গ থেকে মানচিত্রের একটি বিন্দু

একটি অ্যান্টেনা হলো একটি পরিবাহী, যাতে পাশ দিয়ে যাওয়া একটি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ একটি পরিবর্তী প্রবাহ আবিষ্ট করে; গ্রহণকারী অ্যান্টেনা ও প্রেরক অ্যান্টেনা একই যন্ত্র বিপরীত দিকে চালানো, একটি পারস্পরিকতা যা ক্লাসকে স্পষ্টভাবে বলা উচিত। আবিষ্ট প্রবাহ সবচেয়ে বড় হয় যখন পরিবাহী অনুনাদ করে: যখন তার দৈর্ঘ্য এমন যে তার বরাবর প্রবাহের বণ্টন তরঙ্গের দোলনের সঙ্গে মিলে যায়, ঠিক যেমন ঠিক দৈর্ঘ্যের একটি তার একটি নির্দিষ্ট সুরে অনুনাদ করে বা একটি দোলনা ঠেলার একটি নির্দিষ্ট ছন্দে। একটি সোজা পরিবাহীর মৌলিক অনুনাদ অর্ধ তরঙ্গদৈর্ঘ্যে, 1090 MHz-এ 13.75 cm, মাঝে সবচেয়ে বেশি প্রবাহ ও প্রান্তে শূন্য। ব্যবহারিক ADS-B অ্যান্টেনা, বিমানে ও বেশিরভাগ রিসিভারে, একটি চতুর্থাংশ-তরঙ্গ মনোপোল (quarter-wave monopole): একটি পরিবাহী গ্রাউন্ড প্লেনের উপর দাঁড়ানো 6.9 cm-এর একটি খাড়া উপাদান, যাকে প্লেনটি বৈদ্যুতিকভাবে প্রতিফলিত করে, যাতে উপাদান ও প্রতিবিম্ব মিলে অর্ধ-তরঙ্গ ডাইপোল গড়ে। বিমানে

ফিউজেলাজ গ্রাউন্ড প্লেন; একটি কেনা 1090 MHz অ্যান্টেনা তার নলের ভেতরে একই জ্যামিতি লুকিয়ে রাখে, কয়েকবার একটির উপর আরেকটি সাজিয়ে, যাতে তার সংবেদনশীলতা দিগন্তের দিকে কেন্দ্রীভূত হয়। একটি টিনের ঢাকনার উপর 6.9 cm-এর একটি দণ্ড দিয়ে ক্লাসে বানানো একটি মডেল জ্যামিতি ও দৈর্ঘ্যটি দেখায়, 27.5 cm তরঙ্গের বিপরীতে রুলার দিয়ে মাপা; কিন্তু প্রকল্পের রিসিভার কারখানায় সুর-বাঁধা অ্যান্টেনাটি ব্যবহার করে, কারণ কয়েক মিলিমিটারের ভুলে ঘরে বানানো অ্যান্টেনার সুর কেটে যায় আর সে আকাশের সামান্য একটি অংশই শোনে।

বিকিরণ নকশা (radiation pattern) গড়ে তুলুন, কারণ এটি এমন কিছুর পূর্বাভাস দেয় যা ক্লাস পর্যবেক্ষণ করতে পারে। একটি খাড়া মনোপোল দিগন্তের দিকে সবচেয়ে জোরালোভাবে বিকিরণ ও গ্রহণ করে আর নিজের অক্ষ বরাবর একেবারেই নয়; তার সংবেদনশীলতা, তিন মাত্রায় আঁকলে, একটি রিং ডোনাট যার ছিদ্রের মধ্য দিয়ে অ্যান্টেনাটি যায়। তাই একটি রিসিভার সাধারণত 300 km দূরের বিমান নিখুঁতভাবে শোনে আর ঠিক মাথার উপর দিয়ে যাওয়া একটিকে কয়েক সেকেন্ডের জন্য হারায়, আর ক্লাস তাদের নিজেদের রিসিভারে এটি ঘটতে দেখতে পারে। একটি কোলিনিয়ার অ্যান্টেনা, কয়েকটি অনুদীপ উপাদান একটির উপর আরেকটি সাজানো, ডোনাটটিকে চ্যাপটা করে, দিগন্তে সংবেদনশীলতা বাড়ায় যেখানে দূরের বিমান থাকে, মাথার উপরের ছিদ্রের বিনিময়ে: এটিই অ্যান্টেনার গেইন (gain), dBi-তে প্রকাশিত, আর এটি আসে সংবেদনশীলতার পুনর্বণ্টন থেকে, কখনোই সৃষ্টি থেকে নয়। পাঠ 1-এর সমবর্তনের এখন একটি ব্যবহারিক পরিণতি আছে যা প্রকল্প পরীক্ষা করবে: অ্যান্টেনাকে খাড়া হতে হবে।

অ্যান্টেনা ও কম্পিউটারের মাঝে তিনটি ধাপ, প্রতিটি একটি ছোট পাঠ। একটি ব্যান্ড-পাস ফিল্টার 1090 MHz পার হতে দেয় আর কয়েকশ মেগাহার্টজ দূরের অনেক বেশি শক্তিশালী মোবাইল-ফোন সম্প্রচার বাদ দেয়, যা নইলে অ্যামপ্লিফায়ারকে পরিপূর্ণ করে দিত। একটি লো-নয়েজ অ্যামপ্লিফায়ার, রিসিভারের বদলে অ্যান্টেনার কাছে বসানো, কেবলে ঢোকান আগে সংকেতকে হাজার গুণ করে; ক্রমটি গুরুত্বপূর্ণ, কারণ 1090 MHz-এ একটি কোঅক্সিয়াল কেবল প্রতি দশ মিটারে মোটামুটি অর্ধেক সংকেত, 3 dB, হারায়, আর ক্ষয়ের পরে বিবর্ধন করলে সংকেতের সঙ্গে কেবলের গোলমালও বিবর্ধিত হতো। তারপর সফটওয়্যার-নির্ধারিত রেডিও (software-defined radio): 20 ইউরোর একটি USB যন্ত্র, মূলত টেলিভিশন টিউনার হিসেবে তৈরি, যা সংকেতকে বেসব্যান্ডে নামিয়ে আনে আর প্রতি সেকেন্ডে দুই মিলিয়ন বার নমুনা নিয়ে সংখ্যার একটি ধারায় পরিণত করে। সেই বিন্দু থেকে বেতারের সমস্যা একটি প্রোগ্রামিংয়ের সমস্যা। বিনামূল্যের সফটওয়্যার নমুনার ধারায় প্রিঅ্যাম্বলের নকশা খোঁজে, প্রতিটি মাইক্রোসেকেন্ড ঘরের কোন অর্ধে বেশি শক্তি তা মাপে, 112টি বিট জোড়া লাগায়, CRC হিসাব করে, আর তা পাস করলে ফিল্ডগুলো ডিকোড করে। তারপর একটি ট্র্যাকার জোড় ও বিজোড় অবস্থান-ফ্রেম জোড়া লাগায়, ICAO ঠিকানা দিয়ে অবস্থান, বেগ ও পরিচয় একত্র করে, আর বার্তা আসা বন্ধ হওয়া পর্যন্ত প্রতিটি বিমানের অবস্থা ধরে রাখে।

শৃঙ্খলটি ক্লাসকে দিন তাদের নিজেদের আঁকা একটি চিত্র হিসেবে, প্রতিটি ধাপের রাশিহ: অ্যান্টেনায় ন্যানোভোল্টের পরিবর্তী প্রবাহ; অ্যামপ্লিফায়ারের পরে মাইক্রোভোল্ট; SDR থেকে প্রতি সেকেন্ডে দুই মিলিয়ন 8-বিট সংখ্যা; ডিকোডার থেকে 112-বিট ফ্রেম, হয়তো প্রতি সেকেন্ডে কয়েকশ; ট্র্যাকার থেকে প্রতি বিমানে একটি রেকর্ড। যে কথাটি বসাতে হবে তা হলো মানচিত্রের একটি বিন্দু এমন একটি শৃঙ্খলের দূর প্রান্ত যার প্রতিটি কড়া একটি ধারণা যা তারা এখন বোঝে: অনুদাদ, ফিল্টারিং, বিবর্ধন, নমুনায়ন, নকশা মেলানো, ডিকোডিং, ক্রটি পরীক্ষা, সমষ্টিকরণ।

দেওয়ার মতো সমাধান করা উদাহরণ

একটি কেবল 1090 MHz-এ প্রতি 10 m-এ 3 dB হারায়। তাহলে 20 m-এর একটি কেবল সংকেতের কত ভগ্নাংশ হারায়? (6 dB, তিন-চতুর্থাংশ।) রিসিভারের সীমা -100 dBm হলে আর 400 km-এ একটি বিমান থেকে অ্যান্টেনায় সংকেত -91 dBm হলে, সংকেত কি অ্যামপ্লিফায়ার ছাড়া কেবলটি পার হয়ে টিকতে পারে? (কোনোমতে: -97 dBm। আর একটু ক্ষয়, কানেক্টরে বৃষ্টি বা একটু লম্বা কেবল, আর দিগন্তের বিমানটি হারিয়ে যায়। এ কারণেই অ্যামপ্লিফায়ার অ্যান্টেনার কাছে যায়।)

প্রকল্প - দুই থেকে চার সপ্তাহ

একটি রিসিভার বানান আর পদার্থবিজ্ঞানকে আকাশের বিপরীতে পরীক্ষা করুন

প্রকল্পটি পাঁচটি পাঠকে পরিমাপে পরিণত করে। যন্ত্রপাতি হলো একটি USB সফটওয়্যার-নির্ধারিত রেডিও ডংগল (প্রায় 25 ইউরো), কারখানায় সুর-বাঁধা একটি 1090 MHz অ্যান্টেনা (50 থেকে 70 ইউরো), কয়েক মিটার কোঅক্সিয়াল কেবল, আর একটি ল্যাপটপ বা একটি Raspberry Pi যাতে বিনামূল্যের ডিকোডারগুলোর একটি চলে (dump1090 ও তার উত্তরসূরির মানদণ্ড)। ইনস্টল করতে এক বিকেল লাগে আর সফটওয়্যার কয়েক মিনিটের মধ্যে দেখায় বিমানের একটি টেবিল, তাদের ICAO ঠিকানা, কল সাইন, অবস্থান, উচ্চতা ও গতিসহ, আর একটি মানচিত্র। প্রকল্পের সবকিছু কেবল গ্রহণ; কিছুই সম্প্রচার করে না, আর ক্লাসের বোঝা উচিত যে বিমান চলাচলের কম্পক্ষে সম্প্রচার করা একই সঙ্গে বেআইনি ও বিপজ্জনক হতো। ছাদে যেতে স্কুলের স্বাভাবিক অনুমতি লাগে; প্রধান ট্রাফিক প্রবাহের দিকে মুখ করা উপরের তলার একটি জানালা একটি চমৎকার শুরু। এই সাইটের ফিডার হোন পাতা একই ইনস্টলেশন ধাপে ধাপে দেখায় আর স্কুলের রিসিভারকে লাইভ মানচিত্রে ফিড করতে দেয়।

প্রথম অনুসন্ধান বেতার দিগন্ত। ডিকোডার প্রতিটি বিমানের জন্য জানায় কোন দূরত্ব ও উচ্চতায় তাকে শেষবার শোনা গেছে। এক দিন ধরে কয়েকটি উচ্চতা-ব্যান্ডের বিমান যে সর্বোচ্চ পাল্লায় গৃহীত হয়েছে তা সংগ্রহ করুন আর উচ্চতার বিপরীতে পাল্লার লেখচিত্র আঁকুন। শিক্ষার্থীদের কাছে পাঠ 4-এর সূত্র ও অ্যান্টেনার উচ্চতা আছে; তথ্য দেখার আগে তাদের বক্ররেখাটি অনুমান করা উচিত, তারপর তুলনা করা। মিল সাধারণত উঁচু বিমানের জন্য ভালো আর নিচুগুলোর জন্য খারাপ, আর কেন তার আলোচনা (ভবন, ভূপ্রকৃতি, অ্যান্টেনার মাথার উপরের ছিদ্র, বিমানের নিজের ছায়া ফেলা) তত্ত্ব ও পরিমাপের এমন মুখোমুখি হওয়া যা একটি পাঠ্যবই দিতে পারে না। প্রতিটি দিকে শোনা সবচেয়ে দূরের বিমানের একটি মানচিত্র, যা সফটওয়্যার আঁকে, কভারেজে ছায়া হিসেবে পুরো অঞ্চলের ভূপ্রকৃতি দেখায়।

দ্বিতীয়টি অ্যান্টেনা। বার্তার হার ও সর্বোচ্চ পাল্লা তুলনা করুন অ্যান্টেনা ঘরের ভেতরে, একটি জানালায় ও ছাদে থাকলে; খাড়া ও অনুভূমিকভাবে শোয়ানো; একটি ধাতব পৃষ্ঠের উপর দাঁড়ানো ও যেকোনো ধাতু থেকে দূরে ধরে রাখা। প্রতিটি তুলনা পাঠ 1 ও 5-এর একটি নির্দিষ্ট দাবি পরীক্ষা করে, আর প্রতিটি ফল আগে অনুমান করা উচিত। সমবর্তন পরীক্ষাটি সবচেয়ে চমকপ্রদ: শুইয়ে দিলে অ্যান্টেনা তার বেশিরভাগ বিমান হারায়।

তৃতীয়টি তথ্য। পুরো একটি দিনের ট্রাফিক লগ করুন আর তাকে প্রশ্ন করুন: সবচেয়ে ব্যস্ত ঘণ্টা, ক্রুজ উচ্চতার বণ্টন (শিক্ষার্থীরা একটি ছড়ানো বণ্টন আশা করে আর দেখে বেশিরভাগ যাত্রীবাহী বিমান 10 000 থেকে 12 000 m-এর মধ্যে), নিকটতম বিমানবন্দর থেকে ছেড়ে যাওয়া বিমানের আরোহণ হার, যে রাষ্ট্রগুলোর বিমান সবচেয়ে বেশি পার হয় (ICAO ঠিকানা বরাদ্দ থেকে)। বড় দল সফটওয়্যার যে হেক্স লগ করে তা থেকে নিজেরাই কাঁচা বার্তা ডিকোড করতে পারে আর নিজেদের কোডে CRC যাচাই করতে পারে। 30 বা তার বেশি কিলোমিটার দূরের একটি অংশীদার স্কুলে দ্বিতীয় একটি

রিসিভারসহ একটি ক্লাস, দুটিতেই GNSS-টাইমস্ট্যাম্পসহ আউটপুট থাকলে, দুটিই শুনতে পায় এমন একটি বিমানের দ্বিমাত্রিক মাল্টিপ্যাটারেশনের চেষ্টা করতে পারে আর বিমান যে অবস্থান সম্প্রচার করেছে তার সঙ্গে তুলনা করতে পারে: কোর্সের সবচেয়ে উচ্চাভিলাষী ফল, আর একটি সত্যিকারের ফল।

শেষ করুন সেই প্রশ্নগুলো দিয়ে যা ব্যবস্থাটি তোলে কিন্তু উত্তর দেয় না। বার্তাগুলো স্বাক্ষরহীন, তাই একটি ট্রান্সমিটার একটি ভূত বিমান সম্প্রচার করতে পারত; ব্যবস্থাটিকে কী রক্ষা করে, আর একটি স্বাক্ষরিত সংস্করণের খরচ কী হতো? বিমান এমন উপগ্রহের উপর নির্ভর করে যা জ্যাম করা যায়; তা হলে একজন কন্ট্রোলারের ছবির কী হয়? তথ্য বিমানকে শনাক্ত করে, আর একটি বিমান একজন মানুষকে শনাক্ত করতে পারে; কার কাকে অনুসরণ করতে পারা উচিত? যে ক্লাস রিসিভারটি বানিয়েছে তারা এই প্রশ্নগুলো অর্জন করেছে, আর এগুলো একটি ভালো শেষ রচনা বা বিতর্ক হয়।

শিক্ষার্থীর চ্যালেঞ্জগুলোর উত্তর

শিক্ষার্থীর পাতায় আটটি চ্যালেঞ্জ দেওয়া আছে, প্রতি পাঠে এক বা দুটি, যা বাড়ির কাজ বা কোর্স-শেষের পরীক্ষা হিসেবে ব্যবহার করা যায়। উত্তরগুলো, একটি পূর্ণ-নম্বরের উত্তরে যে যুক্তি থাকা উচিত তা-সহ:

- 1090 MHz-এ তরঙ্গদৈর্ঘ্য: $\lambda = c / f = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275 \text{ m}$ । চতুর্থাংশ-তরঙ্গ উপাদান: 6.9 cm। যুক্তি: $c = f \times \lambda$, যেখানে আলোর নির্দিষ্ট গতি একটি বিপরীত সম্পর্ক বাধ্য করে।
- আলো শব্দের চেয়ে $3.00 \times 10^8 / 343$, প্রায় 875 000 গুণ দ্রুত। 30 km-এ বার্তার লাগে 100 মাইক্রোসেকেন্ড আর শব্দের 87 s; 250 m/s গতির বিমান সেই সময়ে 22 km সরে।
- 2 মাইক্রোসেকেন্ডের ঘড়ির ত্রুটি দেয় $2 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 = 600 \text{ m}$ -এর দূরত্ব-ত্রুটি। চারটি উপগ্রহ লাগে কারণ রিসিভারের ঘড়ির অফসেট x, y ও z-এর পাশে চতুর্থ অজানা রাশি।
- $2^{24} = 16\,777\,216$ টি ঠিকানা। প্রতি মাইক্রোসেকেন্ডে 1 বিট হারে একটি 112-বিট বার্তা 112 মাইক্রোসেকেন্ড স্থায়ী, প্রিঅ্যাম্বলসহ 120।
- 8D4840D6...-এ 8D হলো 10001101: প্রথম পাঁচ বিট 10001 হলো 17, তাই DF = 17, একটি Mode S ট্রান্সপন্ডার থেকে ADS-B বার্তা; পরের তিনটি, 101, দেয় CA = 5। 4840D6 হলো ICAO ঠিকানা।
- 15 m অ্যান্টেনা থেকে 9 000 m-এ একটি বিমান পর্যন্ত বেতার দিগন্ত: $4.12 \times (3.87 + 94.9) = 407 \text{ km}$ । 300 m-এ একটি বিমানের জন্য: $4.12 \times (3.87 + 17.3) = 87 \text{ km}$ ।
- দূরত্ব দ্বিগুণ করলে গৃহীত শক্তি এক-চতুর্থাংশ হয়, কারণ একই সম্প্রচারিত শক্তি চার গুণ ক্ষেত্রফলের একটি গোলকের উপর ছড়ায়। 200 km ও 1090 MHz-এ পথ ক্ষয়: $20 \times 2.30 + 60.7 + 32.4 = 139 \text{ dB}$, 400 km-এর চেয়ে 6 dB কম, চার গুণের সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ।
- অনুভূমিকভাবে শোয়ানো অ্যান্টেনা খাড়াভাবে সমবর্তিত তরঙ্গের সঙ্গে আড়াআড়ি-সমবর্তিত আর খুব কমই গ্রহণ করে; আবিষ্ট প্রবাহ নির্ভর করে পরিবাহী বরাবর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের উপাংশের উপর। নিচতলার একটি রিসিভার পাল্লা হারায় কারণ তার দিগন্ত-দূরত্ব, $4.12 \times \sqrt{h_1}$, সংকুচিত হয়, আর কারণ ভবন দৃষ্টিরেখা আটকায়।

এরপর

প্রকল্পটি, ধাপে ধাপে

পাঠ 6-এর প্রকল্প একটি রিসিভার ধরে নিয়েছিল; হাতে-কলমে কর্মশালা সেটি বানায়। এটি লেখা এমন কারও জন্য যিনি কখনো Raspberry Pi ব্যবহার করেননি: দামসহ কেনাকাটার তালিকা, কোন অ্যান্টেনা বেছে নেবেন, তা বসানো ও কেবলের ক্ষয়, Pi তৈরি করা, যে তিনটি কমান্ড Dataero ফিডার ইনস্টল করে, স্টেশন দাবি করা, গেইন সুর বাঁধা, আর পাঁচটি পরিমাপ, প্রতি পাঠে একটি, যা পদার্থবিজ্ঞানকে আকাশের বিপরীতে পরীক্ষা করে। Dataero-তে ফিড করা একটি স্টেশন ক্লাসকে কাজ করার জন্য একটি ড্যাশবোর্ড, একটি কভারেজ মানচিত্র ও এক বছরের ইতিহাস দেয়।

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