

БАЗОВИЙ КУРС - ДЛЯ БУДЬ-ЯКОГО ДОРОСЛОГО

Що таке ADS-B і як воно працює

Дванадцять розділів. Жодних попередніх знань з авіації чи радіотехніки не потрібно; для розв'язаних прикладів досить шкільної математики, а пропустивши їх, ви не втратите нитки. Час читання - близько 50 хвилин.

Навчання - <https://radar.dataero.eu/uk/learning/course> 2026-10-22

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 Проблема: небо, повне літаків, яких ніхто не бачить

РОЗДІЛ 2 До ADS-B: пошук літаків за допомогою радара

РОЗДІЛ 3 Ідея: нехай літак сам нам скаже

РОЗДІЛ 4 Як літак знає, де він перебуває

РОЗДІЛ 5 Анатомія повідомлення

РОЗДІЛ 6 - ФІЗИКА Хвиля: радіо як невидиме світло

РОЗДІЛ 7 - ФІЗИКА Дальність: кривина Землі та згасання сигналу

РОЗДІЛ 8 - ФІЗИКА Антени: як упіймати 27-сантиметрову хвилю

РОЗДІЛ 9 Приймання і декодування

РОЗДІЛ 10 Від одного приймача до карти цілого континенту

РОЗДІЛ 11 Для чого це використовують і де система не дотягує

РОЗДІЛ 12 Коротка історія

Глосарій

ДАЛІ Від теорії до практики: зберіть приймач

РОЗДІЛ 1

Проблема: небо, повне літаків, яких ніхто не бачить

У звичайний будній день європейський повітряний простір перетинає близько 30 000 рейсів. Авіалайнер на крейсерському режимі рухається зі швидкістю приблизно 250 метрів на секунду, тобто 900 km/h; два літаки, що летять назустріч один одному, зближуються на пів кілометра щосекунди. Пілот, який дивиться в ілюмінатор, майже нічого з цього не бачить: на висоті 10 000 метрів інші літаки - лише цятки, а більшість із них однаково ховають хмари. Небо - це тривимірна мережа доріг без жодної намальованої розмітки, і рух на ній водночас швидкий і невидимий.

Управління повітряним рухом існує для того, щоб розводити цей рух. Правила в принципі прості: у контрольованому повітряному просторі літаки тримають на відстані щонайменше 1 000 футів (близько 300 метрів) по вертикалі або на встановленій відстані по горизонталі - зазвичай 5 морських миль (9,3 km) у зоні радарного покриття і значно більше над океанами. Щоб застосовувати ці правила, диспетчер має безперервно й надійно знати положення кожного літака в секторі: не те, де він був хвилину тому, а де він зараз, на якій висоті й куди прямує. Уся тема цього курсу - як здобувають ці знання. Технічний термін для цього - **спостереження**.

Число, яке варто запам'ятати

Зі швидкістю 900 km/h літак пролітає 15 km за хвилину і 250 m за секунду. Будь-який метод спостереження, що оновлюється повільно або з великою похибкою, змушує диспетчера вгадувати саме на тих відстанях, які мають значення.

РОЗДІЛ 2**До ADS-B: пошук літаків за допомогою радара**

Першою відповіддю, розробленою наприкінці 1930-х і вдосконаленою під час Другої світової війни, став **первинний радар**. Велика обертова антена випромінює короткий, дуже потужний імпульс радіоенергії. Коли імпульс натрапляє на літак, крихітна його частка відбивається назад. Радар вимірює час між виходом імпульсу та поверненням відлуння; оскільки радіохвилі поширюються зі швидкістю світла, 300 000 km/s, цей час дає відстань. Напрямок, у який була спрямована антена, дає азимут. Первинний радар чудовий своєю незалежністю: літакові не потрібно жодного обладнання, тому його й досі використовують військові. Але він має й справжні вади. Відлуння від далекого літака надзвичайно слабке, тож передавач мусить бути величезним. Відлуння нічого не каже про те, що це за літак і на якій він висоті. А антені потрібно кілька секунд на один оберт, тож кожен літак видно лише раз на 4-12 секунд, за які він переміщується на відстань до 3 km.

Друга відповідь, **вторинний оглядовий радар** (BOP, англ. SSR), зробила літак учасником. Наземна станція передає запитання - *запит* - на частоті 1030 MHz. Невелика бортова радіостанція, **транспондер**, чує запитання і відповідає на частоті 1090 MHz власним потужним сигналом. Оскільки відповідь передається, а не відбивається, вона в мільйони разів сильніша за радарне відлуння, а оскільки її формує комп'ютер, вона може нести інформацію. У найстарішій формі (Mode A) відповідь містить чотиризначний код ідентифікації, призначений диспетчером; у Mode C - ще й висоту літака. У 1980-х з'явився **Mode S** («S» від selective - вибіркового), у якому кожен транспондер має унікальну 24-бітну адресу, його можна запитувати окремо, і він може відповідати 56- або 112-бітними повідомленнями з даними. Запам'ятайте це число, 1090 MHz, і цю назву, Mode S: ADS-B побудовано безпосередньо на обох.

Вторинний радар став великим кроком уперед, але він досі має два обмеження свого попередника. Літак говорить лише тоді, коли його питають, тож на землі все одно потрібна запитувальна станція в межах досяжності, а це виключає океани, пустелі й гірські масиви. І станції досі потрібна обертова антена, щоб знати, з якого напрямку прийшла відповідь, тож кожен літак видно лише раз за оберт, і на екрані диспетчера досі світиться точка, що стрибає кожні кілька секунд, а не плавно рухомий літак. Щоб це покращити, знадобилося щось принципово інше: спосіб, яким літак повідомляв би своє положення, не чекаючи запиту, і без того, щоб земля взагалі щось вимірювала.

РОЗДІЛ 3

Ідея: нехай літак сам нам скаже

До 1990-х років дозріли дві технології, які уможливили інший підхід. Супутникова навігація дала кожному належно обладнаному літакові точне знання власного положення - значно точніше, ніж будь-який радар міг виміряти з землі. А транспондер Mode S уже забезпечував радіо, здатне надсилати повідомлення з даними на 1090 MHz. Поєднайте одне з другим - і логіка стає неспростовною: замість того щоб земля силкувалася виміряти, де літак, нехай літак, який це вже знає, просто повідомляє про це через рівні проміжки часу всім. Це і є ADS-B, а чотири слова його назви точно його описують.

Воно **автоматичне** (automatic): ніщо не запускає передавання. Транспондер передає за власним розкладом, приблизно двічі на секунду, незалежно від того, чи є поблизу наземна станція і чи робить пілот щось; ба більше, у польоті пілот не може це зупинити, хіба що вимкнувши транспондер, а це заборонено. Воно **залежне** (dependent): кожен елемент повідомлення надходить від власного обладнання літака - положення від його супутникового приймача, висота від барометричного висотоміра, - а земля нічого не вимірює; вона довіряє тому, що їй кажуть. Це **спостереження** (surveillance): його мета - дати іншим знати, де перебуває літак, для управління повітряним рухом і для літаків поблизу, на відміну від навігації, коли літак сам знає, де він, і від зв'язку, тобто розмови з пілотом. І це **радіомовлення** (broadcast): повідомлення не має адресата, підтвердження чи шифрування, і будь-хто з приймачем у межах досяжності чує те саме - чи то диспетчерський центр, чи інший авіалайнер, чи школа.

«Залежне» - це слово, яке непокоїть інженерів і яке найбільше варто пояснити. Радар виконує незалежне вимірювання: якщо прилади літака помиляються, радарові до цього байдуже. ADS-B успадковує кожен похибку власної навігаційної системи літака, і якщо цю систему обдурено або вона відмовила, трансляване положення буде хибним із тією самою впевненістю. Саме тому кожне повідомлення ADS-B поряд із положенням містить оцінку того, наскільки літак довіряє власному положенню (категорії цілісності й точності, з якими ми познайомимося в розділі 5), і саме тому радари не вимкнули.

«Радіомовлення» - це слово, завдяки якому можливий цей курс. Оскільки повідомлення надсилаються відкрито для всіх, їх чує не лише управління повітряним рухом, а й будь-який приймач, налаштований на 1090 MHz, зокрема той, який ви могли б установити на даху школи. Ця сама властивість є джерелом головного обмеження системи, про яке йдеться в розділі 11: повідомлення, яке може прочитати будь-хто, будь-хто може й підробити.

РОЗДІЛ 4

Як літак знає, де він перебуває

Уся система ADS-B тримається на тому, що літак знає власне положення, тож цей розділ присвячено супутниковій навігації. Загальний термін - **GNSS**, Global Navigation Satellite System (глобальна навігаційна супутникова система); найвідоміша з них - американська GPS, а європейська Galileo, російська ГЛОНАСС і китайська BeiDou працюють за тим самим принципом. Кожна система - це угруповання приблизно з 24-30 супутників, що обертаються на висоті близько

20 000 km, далеко над літаками, і кожен із них несе атомний годинник, точний до кількох мільярдних часток секунди. Кожен супутник безперервно передає радіосигнал, який по суті каже: «це супутник номер N, моє положення таке-то, і час, коли я це надіслав, - рівно T».

Приймач на борту чує цей сигнал трохи пізніше, бо радіохвилям потрібен час на шлях: зі швидкістю 300 000 km/s 20 000 km від супутника займають близько 67 тисячних секунди. Приймач порівнює час, записаний у повідомленні, з часом його надходження. Різниця, помножена на швидкість світла, і є відстанню до цього супутника. Одна відстань розміщує приймач десь на сфері навколо супутника. Дві сфери перетинаються по колу; три сфери - у двох точках, одна з яких зазвичай абсурдна (глибоко під землею або далеко в космосі) і відкидається. Отже, трьох супутників було б досить, якби приймач мав ідеальний годинник.

Але він його не має. Атомний годинник коштує десятки тисяч євро й не вмістився б; у приймачі стоїть дешевий кварцовий годинник, похибка якого може значно перевищувати потрібну точність вимірювання часу. І ось тут найелегантніше. Приймач розглядає похибку власного годинника як четверту невідому поряд із трьома координатами положення і слухає четвертий супутник. Чотири рівняння, чотири невідомі: приймач обчислює своє положення і заодно коригує власний годинник з точністю до кількох десятків наносекунд. Саме тому супутниковому приймачеві потрібно щонайменше чотири супутники в зоні видимості, і саме тому кожен приймач GNSS, між іншим, є одним із найточніших годинників у будівлі.

Варто зупинитися на порядках величин, бо вони пояснюють, чому супутникова навігація - це насправді вправа з вимірювання часу, а геометрія тут другорядна. Світло долає 30 сантиметрів за наносекунду і 300 метрів за мікросекунду, тож похибка часу в одну мільйонну секунди перетворюється на похибку положення в 300 метрів, а точність у кілька метрів, яку дає сучасний приймач, відповідає вимірюванню часу з точністю близько десяти наносекунд. Візьмімо конкретний випадок. Супутник позначає сигнал часом 12:00:00,000 000 000; приймач літака чує його о 12:00:00,070 000 000. Час поширення - 0,070 s, отже, відстань дорівнює $0,070 \times 300\,000 \text{ km/s} = 21\,000 \text{ km}$. Якби власний годинник приймача поспішав лише на одну мікросекунду, він обчислив би 21 000,3 km, тобто на 300 метрів далі, і така сама похибка закралася б і у відстані до всіх інших супутників. Саме цю спільну похибку і виявляє та усуває четвертий супутник.

Дві висоти, а не одна

Супутники дають висоту над математичною поверхнею Землі - *геометричну* висоту. Проте висота, яку літак транслює для потреб управління повітряним рухом, не ця. Це **барометрична висота**, що визначається за тиском повітря за бортом літака, виміряним через невеликий отвір у фюзеляжі, який називають приймачем статичного тиску. Тиск повітря зменшується з висотою відомим чином (приблизно на 1 hPa на кожні 8 метрів біля землі, повільніше - вище), і кожен висотомір у світі перетворює тиск на висоту за однією й тією самою стандартною атмосферою з опорним тиском 1013,25 hPa на рівні моря. У день із незвичним тиском барометрична висота кожного літака хибна на ту саму величину, і саме в цьому суть: для ешелонування важить не справжня висота над морем, а те, щоб два літаки, з яких один показує «ешелон 350», а другий «ешелон 340», справді були на відстані 300 метрів один від одного. ADS-B транслює барометричну висоту в повідомленнях про положення з кроком 25 футів (7,6 m) і окремо - різницю між нею та супутниковою висотою, щоб приймач міг відновити обидві.

РОЗДІЛ 5

Анатомія повідомлення

Повідомлення ADS-B, яке використовують авіалайнери в усьому світі, - це передавання Mode S під назвою **розширений сквітер** (extended squitter); «сквітер» - старий радарний жаргон для передавання, надісланого спонтанно, а не у відповідь, а «розширений» - бо зі своїми 112 бітами воно вдвічі довше за початкову відповідь Mode S. Інженери пишуть «1090ES», тобто «розширений сквітер на 1090 MHz». Кожне передавання загалом триває 120 мікросекунд: 8-мікросекундна *пreamбула* - фіксований шаблон із чотирьох імпульсів, який дає приймачеві змогу розпізнати початок повідомлення і синхронізувати свій годинник, - а за нею 112 бітів даних зі швидкістю один біт за мікросекунду.

Як передається біт: імпульсно-позиційна модуляція

Кожен мікросекундний інтервал біта поділено на дві половини. Імпульс радіоенергії в першій половині й тиша в другій означають 1; тиша, а потім імпульс - 0. Отже, на кожен біт припадає рівно один імпульс, хоч би якими були дані, і приймачеві треба лише вирішити, яка половина кожного інтервалу була гучнішою. Ця схема, імпульсно-позиційна модуляція, стійка до тих шумів і завмирань, яких зазнає сигнал на шляху від транспондера до далекої антени, і її дешево декодувати.

Чотири біти в імпульсно-позиційній модуляції: 1, 0, 1, 1



Кожен інтервал триває 1 мікросекунду. Імпульс у першій половині: 1. Імпульс у другій половині: 0.

112 бітів

DF	CA	адреса ICAO	ME - корисне навантаження	PI
5 біти	3 біти	24 біти	56 біти	24 біти
формат низхідної лінії	можливості	унікальний ідентифікатор літака	положення, висота, швидкість, позивний або стан - залежно від коду типу в перших 5 бітах	перевірка помилок (CRC)

Перші п'ять бітів, формат низхідної лінії (downlink format), визначають, що це за повідомлення Mode S; значення 17 означає «ADS-B від транспондера Mode S». 24-бітна **адреса ICAO** - це постійний ідентифікатор літака, що присвоюється під час його реєстрації: можливих адрес 2^24 , тобто 16 777 216, і ICAO, орган ООН з питань цивільної авіації, розподіляє їх блоками між державами. Бельгійські літаки, наприклад, мають адреси від 448000 до 44FFFF у шістнадцятковому записі. На відміну від чотиризначного коду старого Mode A, ця адреса ніколи не змінюється і ніколи не буває спільною, тож приймач уже з першого повідомлення точно знає, який літак він чує.

56-бітне поле **ME** - це власне вміст, а його перші п'ять бітів, *код типу*, визначають, що означає решта. Коди типів від 1 до 4 несуть позивний літака, наприклад BEL1234 або RYR7KL, у вигляді восьми шестибітних символів. Коди від 9 до 18 несуть положення в повітрі з барометричною висотою; від 20 до 22 - те саме із супутниковою висотою. Код 19 несе швидкість: шляхову швидкість, розкладену на складові схід-захід і північ-південь, вертикальну швидкість і різницю між барометричною та супутниковою висотою. Коди 28, 29 і 31 несуть стан: аварійні коди, задану висоту, а також категорії цілісності й точності, які показують, наскільки можна довіряти трансльованому положенню (скажімо, «NIC» 8 гарантує, що справжнє положення з високою ймовірністю перебуває в межах 185 m від повідомленого).

Останні 24 біти - це **циклічний надлишковий код (CRC)**, число, обчислене з попередніх 88 бітів діленням на фіксований поліном. Приймач повторює обчислення на декодованих бітах; якщо результат не збігається, щонайменше один біт пошкоджено в дорозі, і повідомлення відкидається. Оскільки мікросекундний імпульс легко втратити через шум або через накладення повідомлення від іншого літака, саме ця перевірка не пускає спотворені положення на екран диспетчера. Справжнє повідомлення в журналі приймача виглядає так:

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: формат низхідної лінії 17, можливості 5. 4840D6: адреса ICAO, нідерландський літак. 20...: код типу 4, повідомлення ідентифікації, яке декодується в позивний KLM1023. 576098: перевірка помилок.

Як умістити Землю в 34 біти

Повідомлення про положення має лише 17 бітів для широти і 17 для довготи. Це 131 072 кроки навколо всієї земної кулі, близько 300 m кожен на екваторі: далеко не достатньо. ADS-B розв'язує це завдання за допомогою **компактного звітування про положення (CPR)**. Землю поділено на зони; 17 бітів дають дуже точне положення (приблизно до 5 m) у межах зони, але не кажуть, у якій саме. Літак по черзі використовує дві трохи різні сітки зон - «парні» й «непарні» повідомлення, - і приймач, який почув по одному повідомленню кожного виду, може однозначно визначити зону. Після цього для стеження за літаком досить одного повідомлення, адже він навряд чи перескочив би до іншої зони за пів секунди. Це вишуканий прийом, що подвоює корисну точність без жодних додаткових бітів.

Як часто

Транспондер у польоті надсилає повідомлення про положення двічі на секунду, повідомлення про швидкість - двічі на секунду, а свій позивний - кожні п'ять секунд, плюс повідомлення про стан через довші проміжки, тож загалом близько чотирьох-п'яти розширених сквітерів на секунду. Кожен триває 120 мікросекунд; фактично транспондер передає ADS-B значно менше ніж тисячну частку часу. Решту секунди він слухає радарні запити на 1030 MHz і запити систем запобігання зіткненням інших літаків та відповідає на них.

РОЗДІЛ 6 - ФІЗИКА

Хвиля: радіо як невидиме світло

Повідомлення залишає літак у вигляді **радіохвилі**, і найкорисніша ідея всього цього курсу полягає в тому, що радіохвиля і промінь світла - це одне й те саме. Обидва - електромагнітні хвилі: узор електричного й магнітного полів, які коливаються разом і рухаються в просторі зі швидкістю світла c , що становить 299 792 458 метрів на секунду, або приблизно 300 000 km/s. Радіохвилю від зеленого світла, від рентгенівських променів у лікарні чи від мікрохвиль у кухонній печі відрізняє лише те, як швидко коливаються поля: **частота** f , яку вимірюють у герцах (коливаннях на секунду).

Оскільки хвиля поширюється з незмінною швидкістю, частота визначає відстань між двома сусідніми гребенями - **довжину хвилі**, λ . За одну секунду хвиля проходить c метрів і здійснює f коливань, тож кожне коливання займає c / f метрів:

$$c = f \times \lambda$$

Для ADS-B: $\lambda = 300\,000\,000 / 1\,090\,000\,000 = 0,275$ m. Гребені хвилі між літаком і вашою антеною розташовані на відстані 27,5 cm один від одного - це приблизно довжина шкільної лінійки.

Хвиля	Частота	Довжина хвилі	Примітка
FM-радіомовлення	100 MHz	3 m	Автомобільні антени - лише частка цього
ADS-B / Mode S	1 090 MHz	27,5 cm	Також для відповідей транспондерів радарам
Мобільний телефон (діапазон 4G)	1 800 MHz	17 cm	Близький сусід у спектрі
Wi-Fi, мікрохвильова піч	2 450 MHz	12 cm	Та сама частота, зовсім інша потужність
Видиме зелене світло	560 000 000 MHz	0,000 54 mm	Частота в пів мільйона разів вища

Для всього подальшого важливі два наслідки. По-перше, оскільки ця хвиля - світло, вона поширюється по прямих, якщо щось її не відхиляє чи не блокує, і не проходить крізь Землю. Це визначає дальність дії системи - тему розділу 7. По-друге, оскільки довжина хвилі становить 27,5 cm, металеві конструкції, які найсильніше з нею взаємодіють, - антени - мають розміри того самого порядку; це тема розділу 8.

Чому радіо - не звук

Найпоширеніша плутанина - і в дорослих, і в дітей - між радіо і звуком, мабуть, тому, що «радіо» - це коробка, з якої лунає звук. Насправді це не пов'язані між собою явища. Звук - це хвиля тиску в повітрі, ланцюжок молекул, що штовхають своїх сусідів; йому потрібне середовище, він поширюється зі швидкістю 340 m/s і не може подолати вакуум. Радіо не потрібно нічого: воно долає вакуум між супутником і літаком і рухається майже в мільйон разів швидше. Шум двигунів літака і його повідомлення ADS-B залишають його в ту саму мить; повідомлення досягає приймача за 20 km через 67 мікросекунд, а звук - аж через цілу хвилину.

Чому саме 1090 MHz

Ця частота - спадщина. Міжнародні угоди 1950-х років зарезервували діапазон від 960 до 1215 MHz для авіаційної радіонавігації, і 1090 MHz стала частотою відповідей транспондерів вторинних радарів. Коли проектували ADS-B, використати транспондер, уже встановлений на кожному авіалайнері, було значно дешевше, ніж ставити нову радіостанцію, тож ADS-B просто стало ще однією річчю, яку транспондер Mode S повідомляє на 1090 MHz. У США менші літаки, що літають нижче приблизно 5 500 m, можуть натомість використовувати другу систему, UAT на 978 MHz, тому тамтешні приймачі часто слухають обидві частоти.

РОЗДІЛ 7 - ФІЗИКА

Дальність: кривина Землі та згасання сигналу

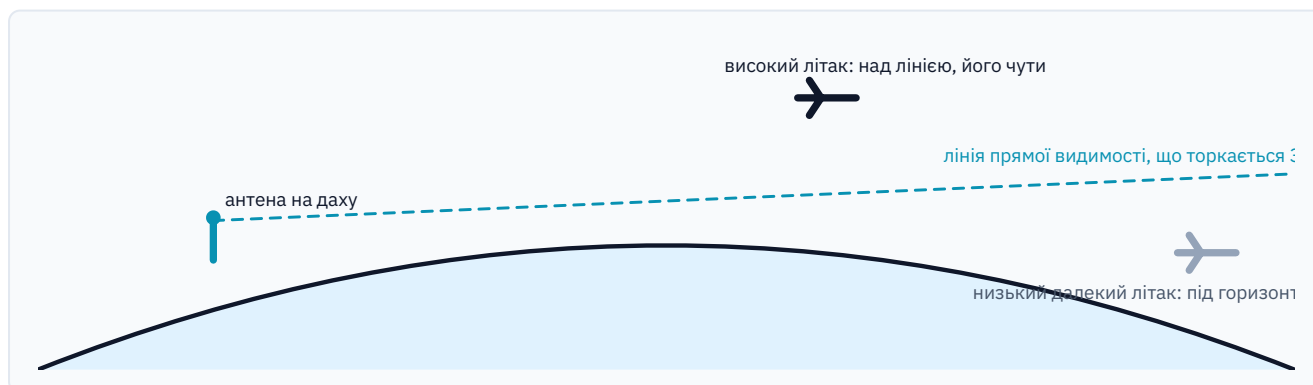
Транспондер передає з піковою потужністю кілька сотень ват. Як далеко можна почути такий сигнал? Дальність обмежують дві зовсім різні речі, і їх варто розрізняти: геометрія, яка встановлює жорстку межу, і потужність, яка встановлює м'яку.

Радіогоризонт

На частоті 1090 MHz радіо поводить себе як світло: воно поширюється по прямих і не огинає Землю. Тому наземна антена може чути літак лише доти, доки між ними є пряма лінія, яка не проходить крізь землю. Для спостерігача на поверхні горизонт - це місце, де ця лінія лише торкається Землі. Що вище літак, то далі ця точка дотику; що вище антена - то ще далі. Геометрія дотичної до сфери дає простий результат: відстань до горизонту в кілометрах дорівнює приблизно 3,57, помноженому на квадратний корінь із висоти в метрах. Атмосфера трохи відхиляє радіохвилі донизу, що розширює горизонт приблизно на 15 відсотків, тож інженери використовують 4,12:

$$d \text{ (km)} = 4,12 \times (\sqrt{h \text{ літака}} + \sqrt{h \text{ антени}}) \quad \text{висоти в метрах}$$

Літак на висоті 11 000 m, антена на даху 20 m: $4,12 \times (104,9 + 4,5) = 451 \text{ km}$. Літак на висоті 1 000 m, той самий дах: $4,12 \times (31,6 + 4,5) = 149 \text{ km}$. Літак на землі за 15 km: його взагалі не чути, хіба що місцевість між вами рівна й відкрита.



Це пояснює характерну форму зони покриття приймача: коло радіусом 400 km і більше для літаків на великій висоті, що звужується до кількох десятків кілометрів для літаків на заході на посадку, і майже нічого для літаків на землі, крім хіба що сусіднього аеропорту. Це також пояснює, чому

висота розміщення приймача важить значно більше, ніж його якість, і чому пагорб, висока будівля чи навіть власне крило літака, коли він накреньється в протилежний від вас бік, можуть миттєво обірвати сигнал.

Закон обернених квадратів

У межах горизонту сигнал слабшає з відстанню. Антена транспондера випромінює в усіх горизонтальних напрямках, тож її потужність розподіляється по дедалі більшій сфері. Площа сфери зростає пропорційно квадрату радіуса, тому потужність, що падає на антену незмінного розміру, зменшується пропорційно квадрату відстані: удвічі далі - чверть потужності; удесятеро далі - сота частка. Інженери виражають це як *втрати на трасі* в децибелах, і для 1090 MHz на 400 km вони становлять близько 145 dB: прийнята потужність приблизно в 10 у степені 14,5 разу менша за передану. Імпульс потужністю 250 ват надходить як приблизно десята частка мільярдної міліват. Добрий приймач здатен це вловити - ледь-ледь, - і тому геометричний горизонт і межа потужності збігаються на кількох сотнях кілометрів: систему так і задумано.

Ці дві межі взаємодіють так, що це варто зрозуміти. У межах горизонту і сильний сигнал від близького літака, і слабкий від далекого декодуються бездоганно, бо імпульсно-позиційна схема з розділу 5 питає лише, яка половина кожного інтервалу біта була гучнішою, а не наскільки. Сигнал не втрачає корисності поступово, коли літак віддаляється; він залишається придатним для декодування, доки десь поблизу горизонту його не обріже геометрія або не заглушить остаточно шум у приймачі, - і трек обривається. Саме тому карти покриття мають чіткі краї, і саме тому найдалші літаки, яких чує приймач, майже завжди ті, що летять найвище.

РОЗДІЛ 8 - ФІЗИКА

Антени: як упіймати 27-сантиметрову хвилю

Антенa - це провідник такої форми, що електромагнітна хвиля, проходячи повз, змушує електрони в ньому рухатися в такт, створюючи крихтний змінний струм, який приймач може підсилити. У передавачі відбувається зворотне: змінний струм в антені літака запускає хвилю. Ефективність цього обміну залежить від розміру провідника відносно довжини хвилі. Прямий провід відгукується найсильніше - *резонує* - тоді, коли його довжина дорівнює половині довжини хвилі: струм, що бігає по ньому туди й назад, точно відповідає коливанню хвилі, як дитяча гойдалка, яку підштовхують у її природному ритмі. Для 1090 MHz половина довжини хвилі становить 13,75 cm.

Найпоширеніша практична форма - **чвертьхвильовий монополь**: вертикальний стрижень завдовжки чверть хвилі, 6,9 cm, що стоїть на провідній поверхні - *противазі* (ground plane). Противага діє як дзеркало, тож стрижень разом зі своїм відображенням поводить як напівхвильова антена. Ось чому антена ADS-B на літаку - це коротеньке лезо заввишки кілька сантиметрів на фюзеляжі, який і слугує противагою, а антена радіоаматора - короткий дріт на бляшаній кришці. Провід неправильної довжини теж працює, але значно гірше: «металеве вухо» налаштоване.

Ще три властивості антени впливають із фізики, і кожна має помітні наслідки. Перша - **поляризація**. Електричне поле електромагнітної хвилі коливається у певному напрямку, перпендикулярному до напрямку її руху, і антена відгукується лише на складову поля вздовж власної довжини. Антени літаків установлено вертикально, тож хвиля ADS-B надходить із

вертикальною поляризацією, і приймальна антена теж має бути вертикальною; покладена набік, вона майже нічого не чує - так само як хвилю на мотузці, яку трусять угору-вниз, зупиняє горизонтальна щілина. Друга - **діаграма спрямованості**. Вертикальна антена найчутливіша в напрямку горизонту і зовсім нечутлива вздовж власної осі, тож її чутливість у трьох вимірах має форму бублика, крізь отвір якого проходить антена. Тому приймачі зазвичай без труднощів чують літаки за 300 km і на кілька секунд втрачають той, що пролітає просто над головою, - за цим варто поспостерігати на будь-якій карті наживо. Якщо поставити кілька резонансних елементів один над одним, бублик стає пласкішим, і чутливість зосереджується в напрямку горизонту, де далекі літаки, коштом простору над головою; саме це й називають **коефіцієнтом підсилення** антени, і це завжди перерозподіл чутливості, а не її створення.

Третя стосується того, що стоїть між антеною і приймачем. Антена вловлює не лише 1090 MHz, а й усі сигнали поблизу, зокрема передавання мобільних телефонів, віддалені на кілька сотень мегагерц і незрівнянно сильніші, тож першим ставлять фільтр, що пропускає лише авіаційний діапазон. Далі сигнал має пройти кабелем, а на 1090 MHz коаксіальний кабель втрачає приблизно половину сигналу на кожні десять метрів; рішення - малoshумний підсилювач біля антени, перед кабелем, щоб сигнал був досить сильним для цього шляху, а не біля приймача, де підсилення посилює б шум кабелю разом із рештками сигналу. Це дрібниці, але саме вони вирішують, чи почує приймач на даху школи літаки біля горизонту, чи лише ті, що поблизу.

РОЗДІЛ 9

Приймання і декодування

Між антеною і точкою на карті - ланцюжок із п'яти етапів. Антена перетворює хвилю, що проходить, на змінний струм у кілька мікрівольт. Фільтр і малoshумний підсилювач залишають діапазон 1090 MHz, відкидають усе інше і підсилюють сигнал у тисячу разів. Програмно-визначене радіо налаштовується на частоту й оцифровує сигнал два мільйони разів на секунду, перетворюючи його на потік чисел. Декодер шукає в цьому потоці шаблон преамбули, зчитує 112 бітів, перевіряє контрольну суму й декодує поля. А трекер збирає повідомлення від кожного літака в єдиний запис, що постійно оновлюється: положення, траєкторія, мітка.

Найдивовижніший - третій етап. Приблизно до 2010 року для декодування 1090 MHz потрібне було спеціальне обладнання вартістю в тисячі євро. Потім радіоаматори з'ясували, що USB-тюнер для телебачення за 20 євро містить мікросхему, яку можна налаштувати на будь-яку частоту і змусити передавати сирий сигнал комп'ютерові. Таке **програмно-визначене радіо** (SDR) перетворює радіотехнічну задачу на програмістську: ноутбук або Raspberry Pi отримує потік із двох мільйонів чисел на секунду, що описують силу сигналу, а безкоштовна програма шукає шаблон преамбули, визначає, яка половина кожного мікросекундного інтервалу гучніша, складає 112 бітів, обчислює CRC і виводить поля. Проєкт приймача в наборі для середньої школи - це саме цей ланцюжок, і школа може зібрати його менш ніж за 100 євро.

На етапі трекера потік повідомлень перетворюється на знання. Пам'ятайте: окреме повідомлення про положення неоднозначне, доки не поєднано парне й непарне. Швидкість надходить окремо від положення, позивний - теж окремо, і трекер зшиває їх за адресою ICAO, відкидає все, що не

пройшло перевірку помилок, і зберігає останній відомий стан кожного літака. Якщо протягом хвилини не надходить жодного повідомлення - зазвичай тому, що літак опустився за горизонт, - трек вважається завершеним.

РОЗДІЛ 10

Від одного приймача до карти цілого континенту

Один приймач чує коло неба діаметром кілька сотень кілометрів. Для карти Європи їх потрібні сотні, і найкорисніші з них розташовані не в містах, а розкидані: на узбережжях, у долинах, на островах - скрізь, куди не сягає коло іншого приймача. Кожен приймач надсилає свої декодовані повідомлення, кожне з позначкою часу надходження, через інтернет до центрального сервісу. Цей сервіс *агрегує* їх: те саме повідомлення від літака на великій висоті зазвичай надходить одночасно від десяти чи двадцяти приймачів, і дублювати треба розпізнати й об'єднати. Він також перевіряє: положення, яке не узгоджується з тим, що бачать усі сусідні приймачі для того самого літака, - найімовірніше, помилка декодування або несправний транспондер, і його позначають або відкидають.

Мультилатерація: як знайти літаки, що не кажуть, де вони

Не кожен літак транслює своє положення. Старіші транспондери відповідають радарам ідентифікатором і висотою, але не мають супутникових даних; деякі літаки навмисно їх не передають. Проте їхні передавання на 1090 MHz однаково досягають землі, і мережа може визначити їхнє місцеперебування, вивернувши супутникову навігацію навиворіт. Якщо чотири приймачі з точно синхронізованими годинниками фіксують момент надходження того самого передавання, різниці між цими моментами розкривають різниці відстаней: повідомлення, яке досягло приймача А на одну мікросекунду раніше, ніж приймача В, надіслано з точки, на 300 м ближчої до А, ніж до В. Усі точки з такою властивістю лежать на викривленій поверхні - гіперболоїді - між А і В. Три такі поверхні від чотирьох приймачів перетинаються в точці, де перебуває літак. Це **мультилатерація**, і вона вимагає точності часу близько десятій частки мікросекунди, тобто 30 м, між приймачами, віддаленими на сотні кілометрів, - і приймачі отримують цей час від тих самих супутників, якими користується літак.

Та сама ідея, двічі

Супутникова навігація: один приймач, чотири передавачі з відомими положеннями - обчислюємо положення приймача. Мультилатерація: один передавач, чотири приймачі з відомими положеннями - обчислюємо положення передавача. В обох випадках насправді вимірюють час, і 1 мікросекунда - це 300 метрів.

РОЗДІЛ 11

Для чого це використовують і де система не дотягує

Перший споживач - управління повітряним рухом. По всій Європі диспетчери тепер бачать об'єднану картину, у якій ADS-B з оновленням двічі на секунду і супутниковою точністю поєднано з радаром і мультилатерацією; там, куди радари ніколи не сягали, - над Північною Атлантикою, Арктикою, Сахарою і більшістю океанів - повідомлення ADS-B вловлюють приймачі на

низькоорбітальних супутниках зв'язку, завдяки чому літаки, що перетинають Атлантику, тепер можна розташовувати значно ближче один до одного, ніж раніше. Другий споживач - самі літаки: авіалайнер із функцією «ADS-B In» показує екіпажеві рух поблизу і передає ці дані в систему запобігання зіткненням. Аеропорти використовують його, щоб відстежувати літаки й транспортні засоби на землі в тумані. Дослідники використовують відкриті дані для вивчення шуму, витрат пального, інверсійних слідів і затримок. А приймач на даху школи - це, хай і в малому, учасник усього цього.

Слабкі місця системи прямо впливають з її задуму, і кожне з них варто зрозуміти, а не просто перелічити. Оскільки повідомлення транслюються відкрито, без шифрування і без підпису, у самому повідомленні немає нічого, що доводило б, що воно надійшло від літака. Наземний передавач міг би - незаконно - транслювати бездоганно сформоване повідомлення про літак, якого не існує, і приймач без заперечень його декодував би. Систему захищає не повідомлення, а контекст навколо нього: фантом не з'явиться на радарі, його не знайде мультилатерація, і він не поводитиметься як справжній літак, а диспетчерські центри постійно все перехресно перевіряють. Версію протоколу з криптографічними підписами обговорюють уже багато років; перешкода радше практична, ніж технічна, бо довелося б замінити кожен транспондер у світі.

Оскільки положення залежить від супутникового приймача літака, усе, що заважає супутниковій навігації, заважає й ADS-B. Глушіння і підробка (спуфінг) супутникових сигналів стали звичними поблизу зон конфліктів, і літак, що пролітає таким районом, може не мати змоги обчислити своє положення або обчислити його хибно. Тоді його повідомлення несуть знижену категорію цілісності, система диспетчера позначає їх, і справу перебирає радар - незалежне вимірювання, яке ADS-B ніколи не мало повністю замінити. Отже, ці дві системи пов'язує не відношення наступника і попередника, а партнерство з взаємодоповнювальними слабкостями.

Оскільки обов'язкові вимоги поширюються на авіалайнери та більшість великих повітряних суден, але не на все, що літає, карта неповна за самим задумом. Легкі літаки поза контрольованим повітряним простором, планери, аеростати і чимало військових літаків можуть узагалі не мати ADS-B, а деякі легкі літаки використовують інші системи, яких приймач на 1090 MHz не чує. А оскільки трансляція ідентифікує літак, вона може ідентифікувати і його власника: стежити за певним приватним літаком - це по суті стежити за певною людиною, і це привело до програм, які приховують реєстраційні номери літаків на прохання власників, а також до тривалої суперечки про те, чи може інформація, яку літак транслює всьому світові, водночас бути приватною. Цю суперечку варто винести на обговорення зі старшими учнями, бо фізика відповіді на неї не дає.

РОЗДІЛ 12

Коротка історія

1935-1945

У Великій Британії, Німеччині та США розроблено первинний радар; наприкінці війни транспондери системи «свій-чужий» відповідають на радарні імпульси кодовою відповіддю - це предок вторинного радара.

1950-1960-ті

Стандартизовано цивільний вторинний радар: запити на 1030 MHz, відповіді на 1090 MHz, коди ідентифікації Mode A і висота Mode C.

1980-ті

У Лабораторії Лінкольна MIT розроблено Mode S з унікальними 24-бітними адресами та повідомленнями з даними, і ICAO його ухвалює. GPS стає доступною для цивільних користувачів.

1990-2000-ті

Визначено й випробувано ADS-B, зокрема на Алясці, де радарне покриття було неможливим, а аварії - частими. Розширений сквітер на 1090 MHz стандартизовано на міжнародному рівні.

2010-ті

Дешеві програмно-визначені радіоприймачі перетворюють приймання на хобі; з'являються волонтерські мережі з тисяч приймачів. Приймачі виводять на супутники для покриття океанів.

2020

ADS-B стає обов'язковим для більшості повітряних суден у контрольованому повітряному просторі США (у січні) та Європейського Союзу (у червні, з перехідним періодом до кінця року). Небо починає говорити - скрізь і весь час.

Глосарій

ADS-B

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (автоматичне залежне спостереження - радіомовлення). Літаки транслюють власне положення.

Барометрична висота

Висота, визначена за тиском повітря згідно зі стандартною атмосферою; саме її повідомляють літаки.

CPR

Компактне звітування про положення - схема з парними й непарними повідомленнями, що вміщує точне положення в 34 біти.

CRC

Циклічний надлишковий код - 24-бітна перевірка помилок, якою закінчується кожне повідомлення.

Розширений сквітер

112-бітне спонтанне передавання Mode S, яке несе ADS-B.

GNSS

Глобальна навігаційна супутникова система: GPS, Galileo, ГЛОНАСС, BeiDou.

Адреса ICAO

Постійний 24-бітний ідентифікатор транспондера літака.

Mode S

Стандарт вибіркового вторинного радару, на якому побудовано ADS-B.

Мультилатерація

Визначення місця передавача за різницею часу надходження сигналу до кількох приймачів.

Втрати на трасі

Ослаблення сигналу з відстанню згідно із законом обернених квадратів.

Радіогоризонт

Найбільша відстань, на якій пряма лінія між антеною і літаком ще проходить над Землею.

SDR

Програмно-визначене радіо: тюнер, що передає сирі відліки сигналу комп'ютерові для декодування.

ВОР (SSR)

Вторинний оглядовий радар: земля надсилає запит, транспондер відповідає.

Довжина хвилі

Відстань між сусідніми гребенями хвилі: c / f , 27,5 см на 1090 MHz.

Транспондер

Бортова радіостанція, яка відповідає радарам і передає ADS-B на 1090 MHz.

ДАЛІ**Від теорії до практики: зберіть приймач**

Дванадцять розділів пояснили систему, яку тепер можна потримати в руці. Практикум перетворює їх на справу на пів дня: що купити за 100-150 євро, як зібрати й розмістити антену, як підготувати Raspberry Pi і встановити фідер Dataero та як побачити літаки, яких ви чуєте, на карті наживо - з вашою станцією як джерелом. Для кожного з розділів вище там чекає своє вимірювання: радіогоризонт на реальних літаках, закон обернених квадратів у стовпці рівня сигналу, добовий ритм неба.

Відкрити практикум <https://radar.dataero.eu/uk/learning/workshop>