

ВІК ВІД 12 ДО 18 РОКІВ - ДЛЯ ВЧИТЕЛЯ

Розшифровуємо небо: фізика та інформатика на прикладі однієї реальної системи

П'ять уроків і проєкт. Кожен урок бере одну частину ADS-B і повністю розкриває фізику або інформатику, що стоїть за нею: виведення формул там, де клас здатен їх простежити, розв'язані приклади з реальними числами, демонстрації, що роблять ідею видимою, і місця, де інтуїція учнів їх підводить. Молодші (12-14 років) засвоюють ідеї та арифметику; старші (15-18 років) опановують виведення і виконують проєкт.

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

ЗМІСТ

Перш ніж почати: чому одна реальна система варта п'яти уроків

УРОК 1 - ФІЗИКА Хвилі та електромагнітний спектр: на чому подорожує повідомлення

УРОК 2 - ФІЗИКА І МАТЕМАТИКА Час і місцезнаходження: як літак знає, де він є, і як мережа знаходить того, хто про це не повідомляє

УРОК 3 - ІНФОРМАТИКА Цифрове повідомлення: 112 бітів, як їх надсилають і як виявляють помилки

УРОК 4 - ФІЗИКА Поширення і дальність: кривина Землі та закон обернених квадратів

УРОК 5 - ФІЗИКА ТА ІНЖЕНЕРІЯ Антени та приймачі: від 27-сантиметрової хвилі до точки на карті

ПРОЄКТ - ВІД ДВОХ ДО ЧОТИРЬОХ ТИЖНІВ Зберіть приймач і перевірте фізику на справжньому небі
Відповіді на завдання для учнів

ДАЛІ Проєкт крок за кроком

Перш ніж почати: чому одна реальна система варта п'яти уроків

Більшість фізики, яку вивчають від 12 до 18 років, подається частинами: тут тема про хвилі, там - про електромагнітний спектр, на інформатиці - про цифрові дані, на географії - згадка про супутники. ADS-B - це єдина діюча система, в якій усі ці частини одночасно несуть навантаження і результат якої клас може спостерігати за допомогою приймача, що коштує менше за підручник. Літак визначає своє місцезнаходження, вимірюючи час проходження радіосигналів від супутників, - це трилатерація і швидкість світла. Він кодує результат у 112 бітах із циклічним надлишковим кодом - це двійкове кодування і виявлення помилок. Він передає їх як радіохвилю з фазово-імпульсною модуляцією на частоті 1090 MHz - це спектр, частота і довжина хвилі. Хвиля досягає приймача лише вздовж прямої лінії, що проходить над кривиною Землі, і слабшає обернено пропорційно квадрату відстані - це геометрія та енергія. Налаштована антена завдовжки в чверть хвилі перетворює її на струм - це резонанс. А мережа приймачів може визначити

місцезнаходження навіть мовчазного передавача за різницею часу надходження сигналу - це супутникова задача, вивернута навиворіт. Кожен із наведених нижче уроків бере одну з цих тем і розвиває її як самостійну, а ADS-B слугує наскрізним прикладом, а не прикрасою.

Базовий курс на головній сторінці подає всю систему в розповідній формі; клас має прочитати його розділи 3 і 5 перед уроком 3, а розділи 6-8 - перед уроками 4 і 5; його глосарій - корисний роздатковий матеріал. Ця сторінка передбачає, що ви його прочитали, і зосереджується на фізиці та методиці викладання. Числові умовності однакові всюди: $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$, $f = 1090 \text{ MHz}$, висоти в метрах, відстані в кілометрах, а літак на крейсерському режимі вважається таким, що летить на висоті 11 000 m (ешелон 360) зі швидкістю 250 m/s, якщо в прикладі не сказано інакше.

Два застереження щодо інтуїції. Учні приходять переконаними, що радіохвилі - це різновид звуку і що «радар» або «супутники» бачать літаки. Обидва уявлення хибні, обидва прямо розглядаються на уроках 1 і 2, і обидва повертатимуться; курс побудовано так, що кожен наступний урок дає вам новий привід їх виправити. До того ж учні, яким зручно з формулами, часто не почуваються впевнено з порядками величин: курс постійно спирається на запитання «а наскільки це велике?» на кожному кроці, бо 300 m за мікросекунду, 145 dB втрат на трасі та 2^{24} адрес - саме такі числа, що роблять фізику відчутною.

УРОК 1 - ФІЗИКА

Хвилі та електромагнітний спектр: на чому подорожує повідомлення

Почніть зі спостереження, на якому тримається весь курс: радіоповідомлення літака і промінь світла - це одне й те саме фізичне явище. Обидва є електромагнітними хвилями - коливаннями електричного і магнітного полів, що поширюються в просторі без жодного середовища зі швидкістю c , однаковою для всіх частот у вакуумі й майже такою самою в повітрі: 299 792 458 m/s, що клас може округлити до $3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$. Величина, яка відрізняє радіо від видимого світла, а видиме світло від рентгенівського випромінювання, - це лише частота коливань f . Наша сітківка реагує на частоти приблизно від 4×10^{14} до $8 \times 10^{14} \text{ Hz}$, які ми сприймаємо як кольори від червоного до фіолетового; ADS-B передається на частоті $1,09 \times 10^9 \text{ Hz}$, тобто приблизно в пів мільйона разів нижчій. За своєю природою хвиля нічим не відрізняється; вибіркові лише наші очі.

Виведіть разом із класом хвильове рівняння, а не просто сформулюйте його. Якщо хвиля поширюється зі швидкістю c і коливається f разів за секунду, то за одну секунду вона просувається на відстань c і здійснює f повних коливань; отже, кожне коливання займає довжину c / f . Ця довжина λ є довжиною хвилі, лямбда, звідки $c = f \times \lambda$. Для ADS-B: $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275 \text{ m}$. Гребені хвилі повідомлення між літаком і приймачем розташовані на відстані 27,5 cm один від одного. Попросіть клас нанести це на спектр, який учні накреслять самі, з логарифмічною віссю: FM-мовлення на 100 MHz і 3 m, ADS-B на 1 090 MHz і 27,5 cm, мобільні телефони на 1 800 MHz і 17 cm, Wi-Fi та мікрохвильові печі на 2 450 MHz і 12 cm, інфрачервоне випромінювання, видиме світло на $5,6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ і 540 nm і так далі аж до рентгенівського. Вправа, у якій хвилю літака розміщують між телефоном і мікрохвильовкою, варта більше за будь-яку таблицю, бо вона показує, що це сусіди.

Тепер прямо розберіться з плутаниною щодо звуку, бо вона загальна і бо саме порівняння навчає обох явищ. Звук - це поздовжня хвиля тиску в середовищі; його швидкість є властивістю середовища: 343 m/s у повітрі за 20 градусів, близько 1 500 m/s у воді й нуль у вакуумі. Радіо - це поперечна електромагнітна хвиля, якій середовище не потрібне взагалі; вона поширюється зі швидкістю c у вакуумі й непомітно повільніше в повітрі. Виразіть різницю числом: $3,00 \times 10^8$ поділити на 343 - це приблизно 875 000. Літак на відстані 30 km, який одночасно видає звук і повідомлення, доставляє повідомлення за 100 мікросекунд, а звук - за 87 секунд; доки звук дійде, літак пролетить 22 km. Для демонстрації візьміть мотузку в класі та ліхтарик на спортивному майданчику: хвиля на мотузці явно потребує мотузки і рухається зі швидкістю, яку задає мотузка, а спалах ліхтарика досягає протилежного кінця без жодної затримки, яку хтось міг би виміряти. Чітко перелічіть, що в мотузки спільного зі світлом (хвиля, довжина хвилі, частота, стала швидкість, а отже, обернена залежність між f і λ), а чого немає (середовища, швидкості порядку метрів за секунду).

Завершіть поляризацію, яку легко показати і яка знадобиться на уроці 5. Електричне поле електромагнітної хвилі коливається в певному напрямку, перпендикулярному до напрямку її поширення. Анени транспондерів на літаках вертикальні, тож хвиля ADS-B поляризована вертикально; приймальна антена також має бути вертикальною, а повернута горизонтально вона майже нічого не чує. Хвиля на мотузці, яку розгойдують вертикально, проходить крізь вертикальну щілину в картонній коробці й зупиняється горизонтальною; два шматки поляризаційної плівки (з пари дешевих 3D-окулярів), схрещені на тлі вікна, показують те саме для світла. Попросіть клас передбачити, що станеться з прийманням, якщо приймальну антену покласти горизонтально. Учні перевірять це передбачення в проєкті.

Приклад для розв'язання

Друга система ADS-B, якою користуються легкі літаки в США, передає на частоті 978 MHz. Яка її довжина хвилі і якою завдовжки була б чвертьхвильова антена для неї? (0,307 m; 7,7 cm.)
Учень, який може це розв'язати, засвоїв урок 1.

УРОК 2 - ФІЗИКА І МАТЕМАТИКА

Час і місцезнаходження: як літак знає, де він є, і як мережа знаходить того, хто про це не повідомляє

Усе, що літак передає про своє місцезнаходження, надходить від супутникової навігації, а супутникова навігація по суті є вимірюванням часу. Кожен супутник GNSS, що обертається на висоті близько 20 200 km, має на борту атомний годинник і передає сигнал, у якому вказано його власне положення і точний момент передавання. Приймач фіксує момент надходження. Різниця, помножена на c , - це відстань до супутника, і одна така відстань розміщує приймач на сфері відповідного радіуса з центром у супутнику. Нехай клас сам виведе кількість: дві сфери перетинаються по колу, три - у двох точках, одна з яких далеко від поверхні Землі й може бути відкинута. Тож трьох супутників достатньо - за умови, що годинник приймача ідеальний. Але нічого подібного в ньому немає: кварцовий генератор відхиляється набагато більше, ніж на потрібні наносекунди. Розв'язок, який і є витонченим серцем теми, полягає в тому, щоб розглядати похибку годинника приймача як четверту невідому й використати четвертий супутник: чотири

рівняння з чотирма невідомими (x, y, z і зсув годинника), що розв'язуються безперервно. Тому приймачеві GNSS потрібні чотири супутники в зоні видимості, а як побічний результат він тримає час із точністю до десятків наносекунд - саме тому приймачі в мережі з уроку 5 синхронізують свої годинники за тими самими супутниками, що й літаки.

Запишіть порядки величин на дошці й постійно до них повертайтеся. Світло проходить 0,300 м за наносекунду і 300 м за мікросекунду. Похибка часу в 1 мікросекунду - це похибка відстані в 300 м; точність сучасного приймача в кілька метрів відповідає вимірюванню часу на рівні десяти наносекунд. Час проходження сигналу від супутника прямо над головою становить $20\,200\text{ km} / 3,00 \times 10^8\text{ km/s} = 0,0673\text{ s}$, а від супутника біля горизонту - близько 0,086 s, тож приймач вимірює різниці в кілька мілісекунд із точністю до стомільйонної їх частки. Запитайте клас, що сталося б, якби годинник супутника поспішав на одну мікросекунду; учні мають побачити, що кожен приймач, який ним користується, змістився б приблизно на 300 м уздовж лінії в бік супутника, - і саме тому годинники супутників коригують із Землі кілька разів на добу.

Розрізніть дві висоти, бо повідомлення містить обидві, а учні завжди про це запитують. Супутниковий розв'язок дає геометричну висоту над референц-еліпсоїдом Землі. Проте літаки повідомляють барометричну висоту: статичний тиск за бортом фюзеляжу, перерахований у висоту за Міжнародною стандартною атмосферою, яка передбачає 1013,25 hPa і 15 градусів на рівні моря та зниження на 6,5 градуса на кожен кілометр. У день, коли реальний тиск відрізняється від стандартного, барометрична висота кожного літака хибна на одну й ту саму величину - а це саме те, що потрібно для ешелонування: два літаки на ешелонах 350 і 360 розділені 1 000 ft за будь-якої погоди. Повідомлення ADS-B про місцезнаходження передають барометричну висоту з кроком 25 футів; повідомлення про швидкість містить різницю між барометричною і геометричною висотою, тож приймач може відновити обидві. Для старшої групи співвідношення MCA $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ - добра вправа для електронної таблиці: оберніть його, щоб знайти h за p , і перевірте, що 11 000 m відповідає приблизно 227 hPa, тобто п'ятій частині тиску на рівні моря.

Тепер виверніть задачу навиворіт. Деякі літаки передають на 1090 MHz без супутникових координат: старші транспондери, що відповідають радару лише ідентифікатором і висотою, або літаки, чий GNSS заглушено. Мережа приймачів усе одно може визначити їхнє місцезнаходження. Припустімо, що чотири приймачі із синхронізованими годинниками фіксують час надходження однієї й тієї самої передачі. Передавач невідомий, приймачі відомі: це задача GNSS, у якій відоме і невідоме помінялися ролями. Повідомлення, що надійшло до приймача A на одну мікросекунду раніше, ніж до приймача B, було надіслано з точки, на 300 м ближчої до A, ніж до B, а геометричне місце таких точок - гіперболоїд із фокусами в A і B. Три незалежні пари з чотирьох приймачів дають три гіперболоїди, перетин яких і є літаком. Це мультилатерація, і для неї потрібно, щоб годинники приймачів узгоджувалися з точністю близько 100 ns, чого вони досягають завдяки супутникам. Для класу зведіть її до двох вимірів за допомогою вправи на шкільному подвір'ї: троє учнів із секундомірами стоять у вимірних точках, четвертий, схований десь, плескає в долоні, троє записують свої затримки з поправкою на час реакції, а клас креслить гіперболи (або, простіше, перебирає можливі положення на масштабному кресленні), щоб знайти того, хто плескав, використовуючи 343 m/s. Потім запитайте, якою мала б бути точність вимірювання часу, щоб зробити те саме з радіо на відстані 200 km, і дайте учням відчути прірву між секундоміром і атомним годинником.

Приклад для розв'язання

Два приймачі на відстані 60 km один від одного зафіксували повідомлення з різницею 50 мікросекунд. Наскільки ближче до першого приймача був літак? (15 km.) Якби годинники розходилися між собою на 1 мікросекунду, якої похибки це завдало б відповіді? (300 m.) Учень, який може пояснити, чому друга відповідь не залежить від відстані, зрозумів, чого вимагає мультилатерація.

УРОК 3 - ІНФОРМАТИКА**Цифрове повідомлення: 112 бітів, як їх надсилають і як виявляють помилки**

Транспондер літака надсилає свої дані ADS-B як розширений сквітер Mode S: преамбула тривалістю 8 мікросекунд, за якою йдуть 112 бітів даних зі швидкістю рівно один біт за мікросекунду. Почніть урок із преамбули, бо вона відповідає на запитання, яке учні ще не здогадалися поставити: як приймач дізнається, що повідомлення почалося, коли канал заповнений шумом та іншими літаками? Преамбула - це фіксований шаблон із чотирьох імпульсів на 0; 1; 3,5 і 4,5 мікросекунди. Декодер постійно шукає цей шаблон; знайшовши його, він знає і те, що далі йде повідомлення, і те, коли саме починається кожен бітовий інтервал. Кожен цифровий протокол, з яким стикалися учні, від Wi-Fi до QR-коду, має свій відповідник, і це слушна нагода про це сказати.

Далі - модуляція. Радіопередавач може бути увімкнений або вимкнений; як тоді передати 1 або 0? ADS-B використовує фазово-імпульсну модуляцію (ФІМ): кожен бітовий інтервал тривалістю одна мікросекунда поділено на дві половини, і імпульс у першій половині, за яким іде тиша, означає 1, а тиша, за якою йде імпульс, - 0. Намалуйте на дошці кілька бітів у вигляді імпульсів і попросіть клас їх прочитати. Потім запитайте, чим це краще за очевидну схему «імпульс - 1, немає імпульсу - 0». З невеликою підказкою виявляються дві причини. На кожен біт завжди припадає рівно один імпульс, тож приймач може утримувати синхронізацію навіть під час довгої серії нулів, і він може визначати кожен біт, порівнюючи, яка половина гучніша, а не перевіряючи, чи перевищив імпульс певний абсолютний поріг, - це робить декодування нечутливим до того, наскільки сильним виявився сигнал. Довга серія нулів у наївній схемі була б не відрізнити від тиші; у ФІМ це рівномірний барабанний ритм імпульсів у других половинах.

Чотири біти з фазово-імпульсною модуляцією: 1, 0, 1, 1

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

Тепер структура 112 бітів, яку клас має вміти відтворити з пам'яті до кінця уроку. Біти 1-5 - це формат низхідної лінії, 17 для ADS-B від транспондера. Біти 6-8 - код можливостей. Біти 9-32 - 24-бітна адреса ICAO, постійний ідентифікатор літака. Біти 33-88 - 56-бітне поле повідомлення, перші п'ять бітів якого, код типу, вказують, що містять решта 51: ідентифікаційне повідомлення (коди

типу 1-4) передає восьмисимвольний позивний як вісім 6-бітних символів; повідомлення про місцезнаходження в повітрі (9-18) містить 12 бітів барометричної висоти, прапорець, що вказує, парний це кадр чи непарний, і по 17 бітів закодованих широти й довготи; повідомлення про швидкість (19) містить складові шляхової швидкості в напрямках схід-захід і північ-південь, вертикальну швидкість і різницю між барометричною та геометричною висотою. Біти 89-112 - 24-бітна контрольна сума. Запропонуйте арифметику: 24 біти адреси дають $2^{24} = 16\,777\,216$ літаків; вісім 6-бітних символів дозволяють по 64 знаки кожен - достатньо для літер, цифр і пробілу; 12 бітів висоти з кроком 25 футів охоплюють 102 400 футів; а 17 бітів широти, якби їх наївно розподілити на 180 градусів, давали б роздільну здатність лише 1,4 km, що й породжує питання, на яке відповідає компактне повідомлення про місцезнаходження (CPR). Поясніть CPR одним абзацом: 17 бітів дають положення всередині зони з точністю до кількох метрів, але не вказують, яка це зона; літак чергує дві сітки зон, парну й непарну, і приймач, що має по одному кадру кожного типу, може однозначно визначити зону, а потім відстежувати літак за окремими повідомленнями. Це гарний приклад того, як отримати більшу точність із тих самих бітів, використовуючи час.

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	місцезнаходження, висота, швидкість, позивний або стан - залежно від коду типу в перших 5 бітах	контроль помилок (CRC)

Дайте класу справжнє повідомлення і дозвольте його розібрати. Шістнадцятковий рядок 8D4840D6202CC371C32CE0576098 складається з 28 шістнадцяткових цифр, тобто 112 бітів. Перетворення перших двох цифр, 8D, у двійковий вигляд дає 10001 101: DF = 17, CA = 5. Наступні шість цифр, 4840D6, - адреса ICAO, яку таблиці розподілу закріплюють за Нідерландами. Подальші цифри, 20 ..., починаються з 00100 - код типу 4, ідентифікаційне повідомлення, а декодування 6-бітних символів, що йдуть далі, дає позивний KLM1023. Останні шість цифр, 576098, - контрольна сума. Клас з електронною таблицею або кількома рядками коду на Python може виконати все декодування за один урок, а мета, до якої варто прагнути, - уміння взяти шістнадцятковий рядок і сказати: «це літак KLM, що повідомляє номер свого рейсу».

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: формат низхідної лінії 17, можливості 5. 4840D6: адреса ICAO, закріплена за Нідерландами. 20...: код типу 4, ідентифікація, позивний KLM1023. 576098: 24-бітна контрольна сума.

Завершіть контрольною сумою, бо це та ідея з інформатики, яку найбільше варто розвинути. Над завантаженим аеропортом повідомлення від різних літаків постійно накладаються одне на одне в приймачі, а імпульси ще й губляться в шумі; декодер неминуче складатиме хибні біти. 24-бітне поле наприкінці - це циклічний надлишковий код (CRC): 88 бітів повідомлення розглядаються як довге двійкове число і діляться - в особливій арифметиці, де віднімання є виключним «або» - на фіксований 25-бітний породжувальний поліном; остача і є CRC. Приймач повторює ділення на декодованих бітах і порівнює результат. Будь-який один спотворений біт, будь-які два й будь-який пакет помилок завдовжки до 24 бітів змінюють остачу, тож спотворене повідомлення

відкидається. Покажіть ідею в малому масштабі на 4-бітному CRC для 8-бітного повідомлення, обчисленому вручну, або на простішому аналогу - контрольній цифрі штрихкоду; потім нехай старша група реалізує справжній CRC-24 у кількох рядках коду і перевірить, що контрольна сума прикладу сходиться, а зміна одного біта призводить до помилки. Це виявлення помилок у тому вигляді, в якому його виконує кожна сучасна система, - у контексті, де пропущена помилка могла б вивести фантомний літак на екран диспетчера.

Приклад для розв'язання

Скільки триває повна передача, і якщо транспондер надсилає 4,5 розширеного сквітера за секунду, яку частку часу він передає ADS-B? (120 мікросекунд; 540 мікросекунд за секунду, 0,054 відсотка.) Скільки літаків теоретично могли б ділити канал, перш ніж він став би постійно зайнятим, якщо не враховувати все інше, що в ньому передається? (Близько 1 850 - саме тому перевантаження над найзавантаженішим повітряним простором є реальною інженерною проблемою.)

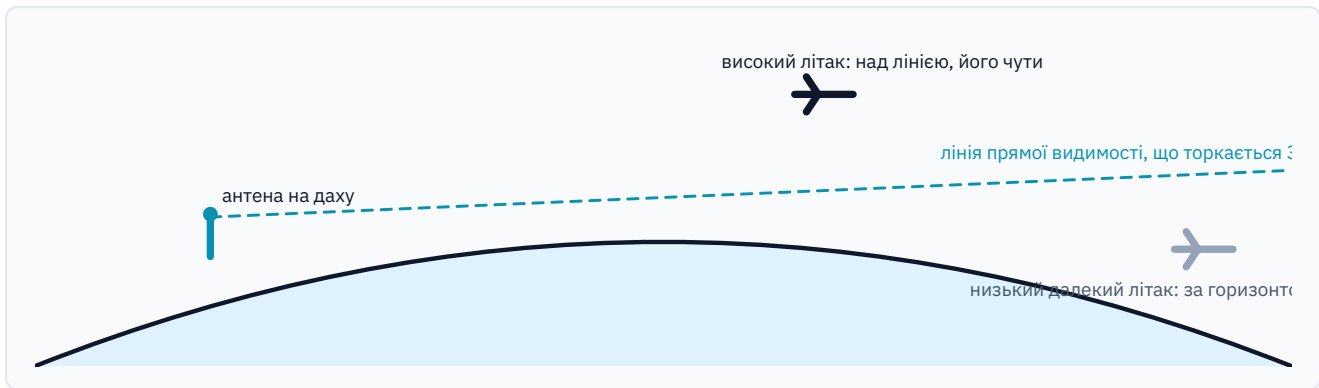
УРОК 4 - ФІЗИКА

Поширення і дальність: кривина Землі та закон обернених квадратів

Наскільки далеко приймач може почути літак? Запитання має дві незалежні відповіді - геометричну та енергетичну, - і мета уроку в тому, щоб вивести обидві й виявити, що розробники системи подбали про те, щоб вони збігалися. Почнімо з геометрії. На частоті 1090 MHz радіохвилі практично не огинають Землю за рахунок дифракції; вони поведуться як світло й поширюються прямолінійно. Отже, приймач може чути лише літаки над своїм горизонтом, тобто літаки, від яких пряма лінія до антени не проходить крізь землю. Виведіть разом із класом відстань до горизонту. Антена на висоті h над кулею радіуса R бачить горизонт там, де її лінія прямої видимості є дотичною до кулі. Дотична, радіус до точки дотику і радіус до антени утворюють прямий кут у точці дотику, тож за теоремою Піфагора $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, звідки $d^2 = 2Rh + h^2$. Оскільки h мізерно мала порівняно з R , $d = \sqrt{2Rh}$. При $R = 6\,371\text{ km}$ і h у метрах d у кілометрах $= \sqrt{2 \times 6371 \times h / 1000} = 3,57 \sqrt{h}$. Густина атмосфери, а отже, і її показник заломлення, зменшується з висотою, що злегка відхиляє радіопромені донизу; стандартна поправка розглядає Землю так, ніби її радіус становить чотири третини справжнього, замінюючи 3,57 на 4,12. Повна дальність прямої видимості від антени на висоті h_1 до літака на висоті h_2 - це сума двох відстаней до горизонту:

$$d \text{ (km)} = 4,12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad \text{де } h_1, h_2 \text{ у метрах}$$

Антена на даху висотою 20 м, літак на висоті 11 000 м: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451\text{ km}$. Та сама антена, літак на висоті 1 000 м: $4,12 \times (4,47 + 31,6) = 149\text{ km}$. Літак на злітно-посадковій смузі за 30 км: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27\text{ km}$, тож його не чути.



Попросіть клас побудувати графік залежності d від h^2 для висоти антени їхньої власної школи; крива, спочатку крута, а потім пологіша, пояснює форму покриття будь-якого приймача: коло радіусом 400 km і більше для літаків на крейсерській висоті, кілька десятків кілометрів для літаків на заході на посадку і нічого на землі, крім аеропорту по сусідству. Вона також пояснює, чому висота важить більше, ніж будь-яка інша характеристика приймача, і чому пагорб між вами та аеропортом або власне крило літака, коли він відвертає з креном, миттєво обриває трек. Демонстрація на подвір'ї з курсу для початкової школи - зі лави видно далі, ніж навпочіпки, - не буде нижчою за рівень цієї вікової групи, якщо за нею йде виведення; суть у тому, що тепер учні знають чому.

Тепер енергія. Транспондер випромінює пікову потужність у кілька сотень ват, приблизно рівномірно в усіх горизонтальних напрямках. На відстані d ця потужність розподіляється по сфері площею $4\pi d^2$, тож потужність, яку перехоплює антена зі сталою ефективною площею, зменшується як $1/d^2$: це закон обернених квадратів, який клас має вивести з площі сфери, а не завчити. Удвічі більша відстань - у чотири рази менша потужність; удесятеро більша - у сто разів менша. Радіоінженери виражають втрати між ізотропним передавачем та ізотропним приймачем у децибелах, і стандартна формула, яку старша група може прийняти на віру або вивести з ефективної площі антени, $\lambda^2 / 4\pi$, має вигляд:

$$\text{втрати на трасі (dB)} = 20 \log_{10}(d \text{ у km}) + 20 \log_{10}(f \text{ у MHz}) + 32,44$$

На відстані 400 km і частоті 1090 MHz: $20 \times 2,60 + 20 \times 3,04 + 32,44 = 52,0 + 60,7 + 32,4 = 145$ dB. Передавач потужністю 250 W - це +54 dBm; отримана потужність становить $54 - 145 = -91$ dBm, близько 8×10^{-13} W, тобто мільйонна частка мільйонної частки вата.

Приділіть кілька хвилин децибелам, якщо клас з ними ще не знайомий, бо вони перетворюють множення в діапазоні чотирнадцяти порядків величини на додавання і бо саме число повчальне: приймач на даху виявляє сигнал, у $10^{14,5}$ разів слабший за той, що залишив літак. Добрий аматорський приймач може декодувати сигнали приблизно до -100 dBm, тож на відстані 400 km є запас близько 9 dB; інакше кажучи, енергетична межа і геометричний горизонт для лайнера на крейсерській висоті припадають на одне й те саме місце. Це не випадковість: потужність транспондера та стандарти приймачів визначено так, щоб літак був чутний до горизонту й не набагато далі, - це не дає каналу переповнитися передачами із сусідньої країни.

Два уточнення для старшої групи. По-перше, ефект Доплера: літак, що наближається зі швидкістю 250 m/s, зсуває прийняту частоту на $f \times v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908 \text{ Hz}$ - менше однієї мільйонної частки несучої, чого приймач ніколи не помічає; порівняйте це з чутним доплерівським зсувом звуку літака, де v / c дорівнює $250 / 343$ і висота тону змінюється майже на октаву, коли він пролітає повз. По-друге, час проходження сигналу: 400 km зі швидкістю c - це 1,33 ms, тож координати в повідомленні вже мають вік 1,33 ms, за які літак переміщується на 33 cm; для карти це нехтовно мало, а для мультилатерації з уроку 2, яка живе саме цими мікросекундами, - вирішально.

Приклад для розв'язання

Приймач на щоглі заввишки 10 m чує літак на крейсерській висоті 11 000 m, але не чує легкий літак на висоті 600 m на відстані 130 km. Чи легкий літак за горизонтом? (Горизонт: $4,12 \times (3,16 + 24,5) = 114 \text{ km}$, тож так.) На якій висоті мав би бути приймач, щоб його почути? (Потрібно $4,12 \times (\text{sqrt}(h1) + 24,5) = 130$, отже, $\text{sqrt}(h1) = 7,05$, $h1 = 50 \text{ m}$.)

УРОК 5 - ФІЗИКА ТА ІНЖЕНЕРІЯ

Антени та приймачі: від 27-сантиметрової хвилі до точки на карті

Антенa - це провідник, у якому електромагнітна хвиля, що проходить повз, наводить змінний струм; приймальна і передавальна антени - це той самий пристрій, що працює в протилежних напрямках, і про цю взаємність класу слід сказати прямо. Наведений струм найбільший, коли провідник резонує: коли його довжина така, що розподіл струму вздовж нього відповідає коливанню хвилі, - точно так, як струна потрібної довжини резонує з певною нотою, а гойдалка - з певним ритмом поштовхів. Основний резонанс прямого провідника припадає на половину довжини хвилі, 13,75 cm на частоті 1090 MHz, зі струмом, найбільшим посередині й нульовим на кінцях. Практична антена ADS-B, і на літаку, і на більшості приймачів, - це чвертьхвильовий монополь: вертикальний елемент завдовжки 6,9 cm, що стоїть на провідній площині заземлення, яка електрично його віддзеркалює, тож елемент і його відображення разом утворюють напівхвильовий диполь. На літаку площиною заземлення є фюзеляж; куплена антена на 1090 MHz ховає ту саму геометрію всередині своєї трубки, повторену кілька разів одна над одною, щоб зосередити чутливість у напрямку горизонту. Модель, виготовлена на уроці зі стрижня завдовжки 6,9 cm на бляшаній кришці, показує геометрію і довжину, яку вимірюють лінійкою й порівнюють із хвилею завдовжки 27,5 cm; проте приймач у проєкті використовує антену, налаштовану на заводі, бо кілька міліметрів похибки розстроюють саморобну, і вона чує лише частку неба.

Розгляньте діаграму спрямованості, бо вона передбачає те, що клас може спостерігати. Вертикальний монополь найсильніше випромінює і приймає в напрямку горизонту й зовсім не випромінює вздовж власної осі; його чутливість, зображена в трьох вимірах, - це бублик, крізь отвір якого проходить антена. Тому приймач зазвичай чудово чує літаки за 300 km і на кілька секунд втрачає той, що пролітає прямо над головою, - і клас може побачити це на власному приймачі. Колінеарна антена, кілька резонансних елементів один над одним, сплющує бублик, підвищуючи чутливість біля горизонту, де перебувають далекі літаки, ціною мертвої зони над

головою: це коефіцієнт підсилення антени, що виражається в dBi і виникає завдяки перерозподілу чутливості, а ніколи не завдяки її створенню. Поляризація з уроку 1 тепер має практичний наслідок, який перевірить проєкт: антена має бути вертикальною.

Між антеною і комп'ютером є три ступені, і кожен - це маленький урок. Смуговий фільтр пропускає 1090 MHz і відсікає значно сильніші передачі мобільного зв'язку, віддалені на кілька сотень мегагерц, які інакше наситили б підсилювач. Малошумний підсилювач, розміщений біля антени, а не біля приймача, підсилює сигнал у тисячу разів, перш ніж той потрапить у кабель; порядок важливий, бо коаксіальний кабель на частоті 1090 MHz втрачає приблизно половину сигналу, 3 dB, на кожних десяти метрах, а підсилення після втрат підсилювало б разом із сигналом і шум кабелю. Далі - програмно-визначене радіо (SDR): USB-пристрій за 20 євро, спочатку створений як телевізійний тюнер, який переносить сигнал на базову смугу і дискретизує його два мільйони разів на секунду в потік чисел. З цього моменту радіотехнічна задача стає задачею програмування. Безкоштовне програмне забезпечення шукає в потоці відліків шаблон преамбули, вимірює, яка половина кожного мікросекундного інтервалу несе більше енергії, складає 112 бітів, обчислює CRC і, якщо перевірку пройдено, декодує поля. Потім трекер поєднує парні та непарні кадри місцезнаходження, об'єднує місцезнаходження, швидкість та ідентифікацію за адресою ICAO і зберігає стан кожного літака, доки повідомлення не перестануть надходити.

Дайте класу цей ланцюжок як схему, яку учні накреслять самі, із зазначенням величини на кожному ступені: нановольти змінного струму на антені; мікрровольти після підсилювача; два мільйони 8-бітних чисел на секунду на виході SDR; 112-бітні кадри на виході декодера, можливо, кілька сотень на секунду; один запис на кожен літак на виході трекера. Головна думка: точка на карті - це дальній кінець ланцюжка, кожна ланка якого є ідеєю, яку учні тепер розуміють: резонанс, фільтрація, підсилення, дискретизація, пошук шаблону, декодування, перевірка помилок, агрегація.

Приклад для розв'язання

Кабель втрачає 3 dB на 10 m на частоті 1090 MHz. Яку частку сигналу втрачає відрізок завдовжки 20 m? (6 dB, три чверті.) Якщо межа чутливості приймача -100 dBm, а сигнал на антені від літака на відстані 400 km становить -91 dBm, чи пройде сигнал крізь кабель без підсилювача? (Ледь-ледь: -97 dBm. Будь-які додаткові втрати - дощ на роз'ємах чи довший кабель - і літак на горизонті зникає. Саме тому підсилювач ставлять біля антени.)

ПРОЄКТ - ВІД ДВОХ ДО ЧОТИРЬОХ ТИЖНІВ

Зберіть приймач і перевірте фізику на справжньому небі

Проєкт перетворює п'ять уроків на вимірювання. Обладнання: USB-донгл програмно-визначеного радіо (близько 25 євро), антена на 1090 MHz, налаштована на заводі (50-70 євро), кілька метрів коаксіального кабелю і ноутбук або Raspberry Pi з одним із безкоштовних декодерів (стандартом є dump1090 та його нащадки). Встановлення займає пів дня, і програма вже за кілька хвилин показує таблицю літаків з їхніми адресами ICAO, позивними, координатами, висотами і швидкостями, а також карту. Усе в проєкті працює лише на приймання; ніщо нічого не передає, і клас має розуміти, що передавання на авіаційних частотах було б і незаконним, і небезпечним. Для доступу на дах потрібен звичайний дозвіл школи; вікно на верхньому поверсі, що виходить у бік

основних повітряних потоків, - цілком добрий початок. Сторінка «Станьте постачальником» на цьому сайті крок за кроком описує те саме встановлення і дозволяє шкільному приймачеві передавати дані на карту наживо.

Перше дослідження - радіогоризонт. Декодер повідомляє для кожного літака відстань і висоту, на яких його було почуто востаннє. Протягом дня зберіть максимальну дальність, на якій приймалися літаки в кількох діапазонах висот, і побудуйте графік залежності дальності від висоти. Учні мають формулу з уроку 4 і висоту антени; вони повинні передбачити криву, перш ніж побачать дані, а потім порівняти. Збіг зазвичай добрий для високих літаків і гірший для низьких, і обговорення причин (будівлі, рельєф, мертва зона антени над головою, затінення власним корпусом літака) - це саме те зіткнення теорії з вимірюванням, якого підручник дати не може. Карта найвіддаленіших почутих літаків у кожному напрямку, яку малює програма, показує рельєф усього регіону як тіні на покритті.

Друге - антена. Порівняйте частоту повідомлень і максимальну дальність з антеною в приміщенні, біля вікна і на даху; вертикальною і покладеною горизонтально; встановленою на металевій поверхні і відсуненою від будь-якого металу. Кожне порівняння перевіряє конкретне твердження з уроків 1 і 5, і результат кожного слід спочатку передбачити. Найвражаючіша - перевірка поляризації: покладена горизонтально, антена втрачає більшість своїх літаків.

Третє - дані. Зареєструйте повний день руху і ставте йому запитання: найзавантаженіша година, розподіл крейсерських висот (учні очікують розкиду, а виявляють, що більшість лайнерів летить між 10 000 і 12 000 m), швидкість набору висоти літаками, що вилітають із найближчого аеропорту, держави, чиї літаки пролітають найчастіше (за розподілом адрес ICAO). Старша група може сама декодувати необроблені повідомлення з шістнадцяткових записів, які зберігає програма, і перевірити CRC у власному коді. Клас, який має другий приймач у школі-партнері на відстані 30 km або більше, причому обидва видають дані з мітками часу GNSS, може спробувати двовимірну мультилатерацію літака, якого чують обидва, і порівняти результат із координатами, які передав сам літак: це найамбітніший результат курсу - і цілком реальний.

Завершіть запитаннями, які система порушує, але на які не відповідає. Повідомлення не мають цифрового підпису, тож передавач міг би транслювати фантомний літак; що захищає систему і скільки коштувала б версія з підписом? Літак залежить від супутників, сигнал яких можна заглушити; що відбувається з картиною на екрані диспетчера, коли їх глушать? Дані ідентифікують літаки, а літак може ідентифікувати людину; хто повинен мати змогу стежити за ким? Клас, що зібрав приймач, заслужив ці запитання, і вони стануть добрим підсумковим есе або темою для дебатів.

Відповіді на завдання для учнів

Сторінка для учнів містить вісім завдань, по одному-два на урок, які можна використати як домашню роботу або як підсумкову перевірку наприкінці курсу. Відповіді з міркуваннями, які має містити відповідь на повний бал:

1. Довжина хвилі на частоті 1090 MHz: $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275 \text{ m}$.
Чвертьхвильовий елемент: 6,9 cm. Міркування: $c = f \times \lambda$, а стала швидкість світла

зумовлює обернену залежність.

2. Світло швидше за звук у $3,00 \times 10^8 / 343$, тобто приблизно в 875 000 разів. На відстані 30 km повідомлення йде 100 мікросекунд, а звук - 87 s; літак зі швидкістю 250 m/s за цей час пролітає 22 km.
3. Похибка годинника у 2 мікросекунди дає похибку відстані $2 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 = 600$ m. Потрібні чотири супутники, бо зсув годинника приймача є четвертою невідомою поряд з x, y і z.
4. $2^{24} = 16\,777\,216$ адрес. 112-бітне повідомлення зі швидкістю 1 біт за мікросекунду триває 112 мікросекунд, а з преамбулою - 120.
5. У 8D4840D6... 8D - це 10001101: перші п'ять бітів 10001 дорівнюють 17, тож DF = 17 - повідомлення ADS-B від транспондера Mode S; наступні три, 101, дають CA = 5. 4840D6 - адреса ICAO.
6. Радіогоризонт від антени на висоті 15 m до літака на висоті 9 000 m: $4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407$ km. Для літака на висоті 300 m: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87$ km.
7. Подвоєння відстані зменшує прийнятну потужність учетверо, бо та сама випромінена потужність розподіляється по сфері вчетверо більшої площі. Втрати на трасі на відстані 200 km і частоті 1090 MHz: $20 \times 2,30 + 60,7 + 32,4 = 139$ dB, на 6 dB менше, ніж на 400 km, що відповідає коефіцієнту чотири.
8. Антена, покладена горизонтально, має поляризацію, перпендикулярну до вертикально поляризованої хвилі, і приймає дуже мало; наведений струм залежить від складової електричного поля вздовж провідника. Приймач на першому поверсі втрачає дальність, бо його відстань до горизонту, $4,12 \times \sqrt{h_1}$, зменшується і бо будівлі перекривають лінію прямої видимості.

ДАЛІ

Проект крок за кроком

Проект уроку 6 передбачав, що приймач уже є; практикум його збирає. Він написаний для того, хто ніколи не користувався Raspberry Pi: список покупок із цінами, яку антену обрати, її розміщення і втрати в кабелі, підготовка Pi, три команди, що встановлюють фідер Dataero, прив'язка станції, налаштування підсилення і п'ять вимірювань - по одному на кожен урок, - що перевіряють фізику на справжньому небі. Станція, яка передає дані Dataero, дає класу панель, карту покриття і рік історії для роботи.

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