

ФІЗИКА ТА ІНФОРМАТИКА - ВІК ВІД 12 ДО 18 РОКІВ

Розшифровуємо небо

Рядок шістнадцяткових цифр нижче - це справжнє повідомлення, надіслане справжнім літаком, який передає такі приблизно двічі на секунду. За 112 мільйонних часток секунди воно повідомляє, що це за літак, а супутні повідомлення - де він, на якій висоті і з якою швидкістю летить. Цей курс розбирає все, що потрібно, щоб його зрозуміти: фізику хвилі, на якій воно їде, вимірювання часу, що дає літаку його положення, кодування, яке пакує все це у 112 біт, геометрію, що обмежує, звідки його можна почути, і приймач, який ти можеш зібрати, щоб почути його сам.

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

ЗМІСТ

Що таке ADS-B - на одній сторінці

УРОК 1 Хвиля: радіо як невидиме світло

УРОК 2 Час і положення: як літак знає, де він

УРОК 3 Повідомлення: 112 біт і як виявляють помилки

УРОК 4 Дальність: вигин Землі і закон обернених квадратів

УРОК 5 Антени і приймачі: від хвилі завдовжки 27 сантиметрів до точки на карті

Завдання

ДАЛІ Збери його

Що таке ADS-B - на одній сторінці

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

Один розширений сквітер (extended squitter) у тому вигляді, як його записує приймач: 28 шістнадцяткових цифр, 112 біт. До уроку 3 ти зможеш прочитати кожне його поле.

Служба керування повітряним рухом мусить безперервно знати, де перебуває кожен літак, щоб розводити їх: авіалайнер у крейсерському польоті долає 250 m щосекунди, а правила ешелонування вимагають між літаками під радарним контролем 300 m по вертикалі або 9 km по горизонталі. Сімдесят років способом це знати був радар: наземна станція надсилає імпульс і вимірює час до відлуння або, в удосконаленому вторинному варіанті, запитує транспондер на борту, який відповідає на частоті 1090 MHz ідентифікатором і висотою. Радар має обмеження: йому потрібна величезна потужність, він бачить кожен літак лише раз за оберт антени і не може охопити океани чи гори.

ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (автоматичне залежне спостереження - трансляція), перевертає задачу. Кожен сучасний літак має приймач супутникової навігації і тому знає своє положення з точністю до кількох метрів. ADS-B просто змушує транспондер літака оголошувати це положення разом з ідентифікатором, висотою і швидкістю приблизно двічі на секунду, на частоті 1090 MHz, нікому конкретно. Автоматичне - бо ніщо його не запускає; залежне

- бо інформація повністю надходить від власних приладів літака; спостереження - бо його мета - знати, де перебувають літаки; трансляція - бо воно надсилається відкрито кожному, хто слухає. З 2020 року воно обов'язкове для більшості повітряних суден у європейському та американському повітряному просторі. Диспетчери використовують його разом із радаром, інші літаки - щоб бачити одне одного, а USB-приймач за 25 євро на даху школи чує точнісінько ті самі повідомлення.

Щоб зрозуміти систему, треба зрозуміти п'ять речей, і кожна з них - це урок: електромагнітну хвилю, що несе повідомлення; вимірювання часу, яке дає літаку його положення і дозволяє мережі знайти літак, що не повідомляє, де він; цифрове повідомлення і те, як у ньому виявляють помилки; геометрію та енергію, що обмежують, звідки його можна почути; і антену з приймачем, що перетворюють його знову на дані. Повний виклад - у базовому курсі; прочитай його розділи 3 і 5 перед уроком 3, а розділи з 6 по 8 - перед уроками 4 і 5.

УРОК 1

Хвиля: радіо як невидиме світло

Повідомлення залишає літак як електромагнітна хвиля: коливні електричне й магнітне поля, що поширюються простором без жодного середовища зі швидкістю світла $c = 3,00 \times 10^8$ m/s.

Видиме світло - те саме явище на вищій частоті; твої очі реагують приблизно на $4\text{--}8 \times 10^{14}$ Hz, тоді як ADS-B передається на частоті $1,09 \times 10^9$ Hz, у пів мільйона разів нижчій. Між повідомленням літака і світлом від цього екрана немає жодної відмінності за природою - лише за частотою.

Оскільки хвиля рухається з фіксованою швидкістю, її частота визначає довжину хвилі. За одну секунду хвиля просувається на c метрів і виконує f циклів, тож кожен цикл займає c / f метрів: $c = f \times \lambda$. Для ADS-B $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. Хвиля, що проходить між літаком і твоєю антеною, має гребені на відстані 27,5 cm один від одного - на спектрі це між сигналом мобільного телефону (17 cm) і FM-радіостанцією (3 m). Намалюй цей спектр сам на логарифмічній осі від 10^6 Hz до 10^{18} Hz і розмісти на ньому FM-радіо, ADS-B, мобільні телефони, Wi-Fi, інфрачервоне випромінювання, видиме світло і рентгенівське. Хвиля літака опиниться серед речей, що лежать у тебе в кишені.

$$c = f \times \lambda$$

$$3,00 \times 10^8 \text{ m/s} = 1,09 \times 10^9 \text{ Hz} \times 0,275 \text{ m}$$

Чим радіохвиля не є, то це звуком. Звук - це хвиля тиску в середовищі, що поширюється зі швидкістю 343 m/s у повітрі, 1 500 m/s у воді і зовсім не поширюється у вакуумі. Радіо - це світло: йому не потрібне середовище, саме тому воно долає вакуум між супутником і літаком, і воно швидше в $3,00 \times 10^8 / 343$, тобто приблизно в 875 000 разів. Якщо літак за 30 km від тебе в ту саму мить видасть звук і повідомлення, повідомлення прийде за 100 мікросекунд; звук прийде через 87 секунд, коли літак уже пролетить 22 km. Хвиля на мотузці має спільні зі світлом властивості, які тут важливі, - довжину хвилі, частоту і фіксовану швидкість, тож швидше трясіння дає коротші хвилі, а не швидші; відрізняється вона тим, що їй потрібна мотузка.

Одна властивість хвилі матиме значення в уроці 5: її поляризація. Електричне поле коливається у визначеному напрямку, перпендикулярному до напрямку поширення. Анени літаків вертикальні, тож хвиля ADS-B поляризована вертикально, і приймальна антена, покладена набік, майже нічого з неї не перехоплює - так само як хвилю на мотузці, яку трясуть вертикально, зупиняє горизонтальна щілина. Передбач уже зараз, що станеться з дальністю твого приймача, якщо антена буде горизонтальною; ти перевіриш це в проєкті.

УРОК 2

Час і положення: як літак знає, де він

Положення в кожному повідомленні ADS-B береться із супутникової навігації, а супутникова навігація - це вимірювання часу. Близько тридцяти супутників у кожній системі (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) обертаються на висоті приблизно 20 200 km, кожен має атомний годинник і кожен передає сигнал, у якому вказано його власне положення і точну мить передавання. Приймач на літаку фіксує мить надходження. Різниця, помножена на c , - це відстань до цього супутника; від супутника прямо над головою сигнал іде $20\,200 / 300\,000 = 0,0673$ s. Одна відстань розміщує приймач на сфері навколо цього супутника; дві сфери перетинаються по колу; три - у двох точках, одна з яких далеко від Землі і відкидається. Трьох супутників вистачило б, якби приймач мав ідеальний годинник. Але він має кварцовий кристал, що відхиляється на мікросекунди, а одна мікросекунда - це 300 m дальності. Тож приймач розглядає похибку власного годинника як четверту невідому і використовує четвертий супутник: чотири рівняння, чотири невідомі (x, y, z і зсув годинника), що розв'язуються безперервно. Як побічний результат, кожен супутниковий приймач тримає час із точністю до десятків наносекунд, і від цього залежить друга половина цього уроку.

Запам'ятай порядки величин: світло проходить 0,3 m за наносекунду і 300 m за мікросекунду. Положення з точністю до 3 m означає вимірювання часу з точністю до 10 ns. Супутник, чий годинник поспішав би на 1 мікросекунду, зсунув би кожен приймач, що ним користується, на 300 m уздовж лінії до нього, - саме тому годинники супутників коригують із землі кілька разів на день.

Літак має дві висоти. Супутниковий розв'язок дає геометричну висоту над опорним еліпсоїдом. Але висота, яку він транслює для потреб керування повітряним рухом, - барометрична: тиск повітря в отворі на фіюзеляжі, перерахований у висоту за Міжнародною стандартною атмосферою, яка передбачає 1013,25 hPa і 15 градусів C на рівні моря та спад температури на 6,5 градуса на кілометр. Коли реальний тиск відрізняється від стандартного, барометрична висота кожного літака помиляється на ту саму величину, а це саме те, що потрібно для ешелонування: два літаки на ешелонах 350 і 360 перебувають на відстані 1 000 ft один від одного за будь-якої погоди. Повідомлення про положення несе барометричну висоту з кроком 25 футів; повідомлення про швидкість несе різницю між барометричною і геометричною висотою. Якщо маєш електронну таблицю, оберни формулу $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ і перевір, що на висоті 11 000 m тиск становить близько 227 hPa, менше чверті від тиску на рівні моря: у повітрі, крізь яке летить авіалайнер, ти не зберіг би свідомість.

А тепер переверни всю ідею. Деякі літаки передають на 1090 MHz без положення: старі транспондери, що відповідають радару лише ідентифікатором і висотою, або літаки, чий супутниковий прийом заглушено. Мережа приймачів усе одно може визначити їхнє місце за

допомогою мультилатерації. Припустімо, чотири приймачі із синхронізованими годинниками записують час надходження однієї й тієї самої передачі. Повідомлення, що дійшло до приймача А на одну мікросекунду раніше, ніж до приймача В, було надіслане з точки, що на 300 м ближча до А, ніж до В, а всі такі точки утворюють гіперболоїд із фокусами в А і В. Три незалежні пари з чотирьох приймачів дають три гіперболоїди, які перетинаються в точці, де перебуває літак. Це та сама задача, що й із супутниками, тільки відоме й невідоме помінялися місцями: там - один приймач і чотири відомі передавачі; тут - один передавач і чотири відомі приймачі. В обох випадках вимірюють час, і 1 мікросекунда - це 300 м. Приймачі синхронізують свої годинники з точністю близько 100 ns за тими самими супутниками, якими користується літак.

Це можна зробити зі звуком. Троє людей із секундомірами стоять у заміряних точках на спортивному полі; четверта, схована, один раз плескає в долоні; кожен записує затримку. За швидкості звуку 343 м/с різниця в 0,1 s - це 34 м, і масштабне креслення з пробними положеннями або ескіз гіпербол дозволить знайти того, хто плескав. Потім запитай себе, якої точності мали б бути секундоміри, щоб зробити те саме з радіо на відстані 200 km, - і ти зрозумієш, навіщо мережі атомний час.

УРОК 3

Повідомлення: 112 біт і як виявляють помилки

Транспондер надсилає ADS-B як розширений сквітер Mode S: 8-мікросекундна преамбула, а потім 112 біт даних зі швидкістю один біт за мікросекунду. Преамбула - це фіксований шаблон із чотирьох імпульсів на 0; 1; 3,5 і 4,5 мікросекунди, і її завдання - відповісти на запитання, яке ти, можливо, й не думав ставити: як у каналі, повному шуму та інших літаків, приймач дізнається, що повідомлення почалося і коли починається кожен біт? Декодер безперервно чекає на цей шаблон, і коли бачить його, дізнається і те, і те. Кожен цифровий протокол, яким ти користуєшся, від Wi-Fi до QR-коду, має щось подібне.

Передавач може бути увімкненим або вимкненим; як же він надсилає 1 чи 0? ADS-B використовує позиційно-імпульсну модуляцію (PPM). Кожен одномікросекундний інтервал біта поділено навпіл: імпульс у першій половині і тиша в другій - це 1; тиша, а потім імпульс - це 0. На кожен біт завжди припадає рівно один імпульс. Подумай, чому це краще, ніж «імпульс означає 1, немає імпульсу - 0». Приймач ніколи не втрачає синхронізацію навіть на довгій серії нулів, яку в наївній схемі неможливо було б відрізнити від тиші. І він визначає кожен біт, порівнюючи, яка половина гучніша, а не перевіряючи, чи перевищив імпульс якийсь фіксований рівень, тож слабкий сигнал за 400 km розшифровується так само надійно, як сильний - прямо над головою.

Чотири біти у позиційно-імпульсній модуляції: 1, 0, 1, 1



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

112 біт розташовано так, і ти маєш уміти відтворити це з пам'яті. Біти з 1 по 5: формат низхідної лінії (downlink format), 17 для ADS-B від транспондера. Біти з 6 по 8: код можливостей (capability). Біти з 9 по 32: 24-бітна адреса ICAO, постійний ідентифікатор літака, присвоєний під час реєстрації; їх існує $2^{24} = 16\,777\,216$, і їх розподілено між державами блоками - Бельгії належать адреси від 448000 до 44FFFF у шістнадцятковому записі. Біти з 33 по 88: 56-бітне поле повідомлення, перші п'ять бітів якого, код типу (type code), визначають, що містять решта 51. Коди типу з 1 по 4 несуть позивний у вигляді восьми 6-бітних символів, по 64 можливі символи кожен. Коди типу з 9 по 18 несуть положення в повітрі: 12 біт барометричної висоти з кроком 25 футів, прапорець парності/непарності та по 17 біт закодованої широти й довготи. Код типу 19 несе швидкість у вигляді складових шляхової швидкості схід-захід і північ-південь, вертикальну швидкість і різницю між барометричною та геометричною висотою. Біти з 89 по 112: 24-бітна контрольна сума (parity). Перевір арифметику: 12 біт висоти з кроком 25 ft охоплюють 102 400 ft; 17 біт, використані наївно на 180 градусів широти, дали б роздільність лише 1,4 km. Положення точніше завдяки компактному звітуванню про положення (CPR): 17 біт дають положення всередині зони з точністю до кількох метрів, але не саму зону, а літак чергує дві сітки зон - парну й непарну. Приймач, що почув по одному повідомленню кожного виду, однозначно визначає зону і далі відстежує літак за поодинокими повідомленнями. Більше точності з тих самих бітів - ціною часу.

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

Розбери справжнє повідомлення з початку цієї сторінки. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 - це 28 шістнадцяткових цифр, 112 біт. Перші дві цифри, 8D, у двійковому записі - 1000 1101; перші п'ять бітів, 10001, - це 17, отже, це ADS-B від транспондера, а наступні три, 101, дають можливості 5. Наступні шість цифр, 4840D6, - адреса ICAO, яку таблиці розподілу відносять до Нідерландів. Наступна пара цифр, 20, починається з 00100 - код типу 4, ідентифікаційне повідомлення, і розшифрування наступних 6-бітних символів дає позивний KLM1023. Останні шість цифр, 576098, - контрольна сума. За допомогою електронної таблиці або кількох рядків коду ти можеш виконати все розшифрування, і вміння подивитися на рядок шістнадцяткових цифр і сказати «літак KLM оголошує рейс 1023» - мета цього уроку.

Контрольна сума заслуговує найбільше роздумів. Над жвавим аеропортом передачі різних літаків постійно накладаються одна на одну в приймачі, а окремі імпульси губляться в шумі; декодер неминуче іноді збиратиме хибні біти. Останні 24 біти - це циклічний надлишковий код (CRC): 88 бітів повідомлення розглядають як одне довге двійкове число і ділять - в арифметиці, де віднімання - це виключне АБО, - на фіксований 25-бітний породжувальний поліном; остача і є CRC. Приймач повторює ділення над розшифрованими бітами. Будь-який один перевернутий біт, будь-які два і будь-який пакет помилок завдовжки до 24 біт змінює остачу, і повідомлення відкидається. Спробуй вручну 4-бітний CRC на 8-бітному повідомленні, щоб побачити механізм, а потім, якщо програмуєш, реалізуй справжній CRC-24 і переконайся, що приклад повідомлення

проходить перевірку, а перевертання будь-якого одного біта змушує її провалитися. Так виявляють помилки всі сучасні системи, і тут це особливо важливо: пропущена помилка могла б вивести на екран диспетчера літак-привид.

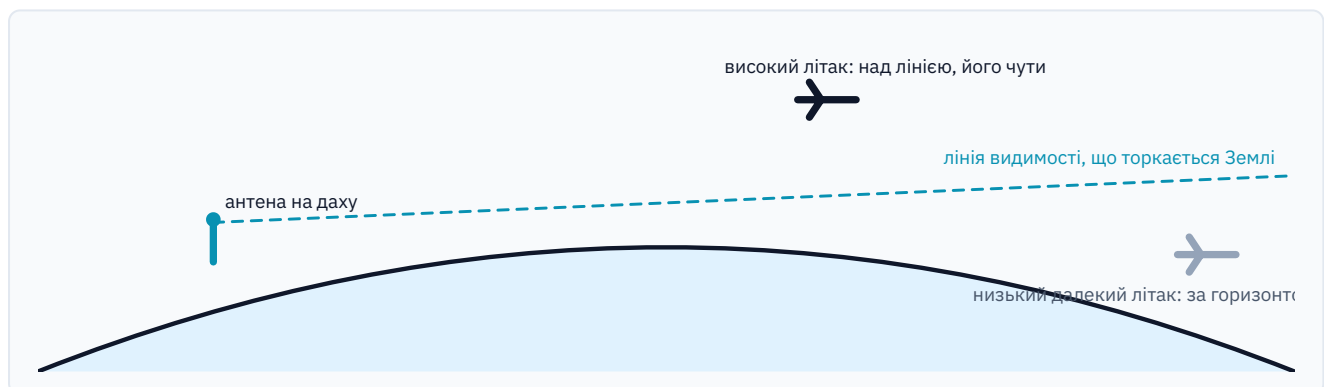
УРОК 4

Дальність: вигин Землі і закон обернених квадратів

З якої відстані приймач може почути літак? Тут діють дві різні межі, і їх варто розрізняти. Перша - геометрична. На частоті 1090 MHz радіо не огинає Землю; воно поширюється прямолінійно, тож приймач чує лише літаки над своїм горизонтом - ті, від яких пряма лінія до антени проходить над землею. Виведи відстань до горизонту. Антена на висоті h над сферою радіуса R бачить горизонт там, де її лінія видимості дотична до сфери; дотична і два радіуси утворюють прямий кут у точці дотику, тож $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, звідки $d^2 = 2Rh + h^2$, а оскільки h нехтовно мале порівняно з R , $d = \sqrt{2Rh}$. Для $R = 6\,371$ km і h у метрах d (km) = $3,57 \sqrt{h}$. Атмосфера трохи вигинає радіохвилі донизу, бо її показник заломлення зменшується з висотою; стандартна поправка вважає радіус Землі рівним чотирьом третім від справжнього, замінюючи 3,57 на 4,12. Повна лінія 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 11 000 м: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451$ km. Та сама антена, літак на 1 000 м: 149 km. Літак на злітно-посадковій смузі за 30 км: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27$ km, тож його не чути.



Побудуй графік d залежно від h_2 для висоти своєї антени. Крива спочатку крута, а потім вирівнюється, і вона пояснює форму покриття кожного приймача: 400 km і більше для літаків на крейсерській висоті, кілька десятків кілометрів для літаків на заході на посадку і нічого на землі, крім сусіднього аеропорту. Вона пояснює, чому висота - найважливіша властивість приймача і чому пагорб, будівля чи навіть крило самого літака, коли той закладає віраж, можуть миттєво обірвати трек.

Друга межа - енергетична. Транспондер випромінює кілька сотень ватів, приблизно рівномірно в усіх горизонтальних напрямках. На відстані d ця потужність розподілена по сфері площею $4\pi d^2$, тож потужність, яку перехоплює антена з фіксованою ефективною площею, спадає як $1/d^2$: це закон обернених квадратів, який варто виводити з площі сфери, а не завчати. Удвічі далі - чверть потужності; удесятеро - сота частина. Інженери виражають втрати в децибелах, де 10 dB - це

десятикратна зміна потужності, а 3 dB - дворазова, бо децибели перетворюють множення через багато порядків величини на додавання. Втрати на поширення у вільному просторі між двома простими антенами становлять:

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

На відстані 400 km і частоті 1090 MHz: $52,0 + 60,7 + 32,4 = 145 \text{ dB}$. Передавач на 250 W - це +54 dBm; прийнята потужність $54 - 145 = -91 \text{ dBm}$, близько $8 \times 10^{-13} \text{ W}$.

На цьому числі варто зупинитися: приймач на даху виявляє сигнал у $10^{14,5}$ разів слабший за той, що залишив літак, - мільйонну частку мільйонної частки вата. Добрий аматорський приймач розшифровує сигнали до приблизно -100 dBm, тож на відстані 400 km є запас 9 dB. Інакше кажучи, енергетична межа і геометричний горизонт для авіалайнера на крейсерській висоті збігаються, і це задумано: потужність транспондерів і стандарти приймачів визначили так, щоб літак було чути до його горизонту і ненабагато далі, - це не дає каналу переповнитися рухом із сусідньої країни.

Два уточнення. Доплер: літак, що наближається зі швидкістю 250 m/s, зсуває прийнятну частоту на $f v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908 \text{ Hz}$, менш ніж на одну мільйонну, і приймач цього ніколи не помічає; порівняй зі звуком того самого літака, де v / c дорівнює $250 / 343$, і тон, коли літак пролітає, падає майже на октаву. І час поширення: 400 km зі швидкістю c - це 1,33 ms, тож передане положення на момент надходження вже застаріло на 1,33 ms, за які літак пролетів 33 см; для карти це нехтовно, а для мультилатерації - вирішально, бо вона живе саме цими мікросекундами.

УРОК 5

Антени і приймачі: від хвилі завдовжки 27 сантиметрів до точки на карті

Антенa - це провідник, у якому електромагнітна хвиля, що проходить повз, наводить змінний струм; той самий пристрій, якщо через нього пропускати струм, випромінює хвилю: приймальна і передавальна антени - це одне й те саме, що працює в протилежних напрямках. Наведений струм найбільший при резонансі, коли довжина провідника дозволяє розподілу струму вздовж нього узгодитися з коливанням хвилі - так само як струна правильної довжини резонує з певною нотою. Основний резонанс прямого провідника - на половині довжини хвилі, тобто 13,75 cm на частоті 1090 MHz, зі струмом, найбільшим у центрі і нульовим на кінцях. Практична антена ADS-B - і на літаках, і на більшості приймачів - це чвертьхвильовий монополь: вертикальний елемент завдовжки 6,9 cm на провідній площині заземлення, яка віддзеркалює його так, що елемент разом зі своїм відображенням утворюють напівхвильовий диполь. На літаку площиною заземлення слугує фюзеляж; куплена антена на 1090 MHz ховає ту саму геометрію всередині своєї трубки, повторену кілька разів одна над одною. Саморобну антену розстроюють кілька міліметрів похибки, і вона чує лише частку неба, - саме тому приймач у проєкті використовує антену, налаштовану на заводі.

Вертикальний монополь найчутливіший у напрямку горизонту і зовсім не чутливий уздовж власної осі; його чутливість у трьох вимірах має форму бублика, крізь отвір якого проходить антена. Тож твій приймач чудово чути літаки за 300 km і на кілька секунд втрачатиме той, що пролітає прямо над головою, - і ти зможеш побачити, як це відбувається. Колінеарна антена, кілька резонансних елементів, складених один над одним, сплющує бублик і підвищує чутливість біля горизонту за рахунок «дірки» над головою: це коефіцієнт підсилення антени, що вимірюється в dBi, і він виникає з перерозподілу чутливості, а ніколи не з її створення. І, як ми знаємо з уроку 1, антена має бути вертикальною, бо хвиля поляризована вертикально.

Між антеною і точкою на карті - чотири етапи. Смуговий фільтр пропускає 1090 MHz і відсікає набагато сильніші сигнали мобільних телефонів за кілька сотень мегагерців звідти, які інакше переважали б усе, що стоїть після нього. Малощумний підсилювач біля антени збільшує сигнал у тисячу разів ще до кабелю, який на частоті 1090 MHz втрачає близько 3 dB, тобто половину сигналу, на кожні десять метрів; якщо підсилувати після кабелю, підсилиш і шум кабелю. Програмно-визначене радіо (SDR) - USB-пристрій за 20 євро, який спочатку продавали як телевізійний тюнер, - переносить сигнал на нижчу частоту й оцифровує його два мільйони разів на секунду, перетворюючи на потік чисел. Далі - програмування: безкоштовне програмне забезпечення шукає у відліках преамбулу, вимірює, яка половина кожного мікросекундного інтервалу несе більше енергії, збирає 112 біт, обчислює CRC і, якщо перевірку пройдено, розшифровує поля. Потім трекер поєднує парні й непарні кадри положення, об'єднує положення, швидкість та ідентифікатор за адресою ICAO і зберігає стан кожного літака, доки повідомлення не перестануть надходити - зазвичай тому, що він опустився за горизонт.

Намалюй цей ланцюжок із величиною на кожному етапі: нановольти на антені, мікрровольти після підсилювача, два мільйони відліків на секунду на виході радіо, кілька сотень кадрів на секунду на виході декодера, один запис на літак на виході трекера. Точка на карті - це дальній кінець ланцюжка, у якому кожна ланка - ідея з цього курсу: резонанс, фільтрація, підсилення, дискретизація, пошук шаблону, розшифрування, перевірка помилок, агрегація. Проєкт полягає в тому, щоб зібрати цей ланцюжок і перевірити курс на справжньому небі: виміряй максимальну дальність залежно від висоти і порівняй її з формулою горизонту; порівняй антену в приміщенні, біля вікна і на даху, вертикальну й горизонтальну; запиши трафік за добу і знайди найжвавішу годину і типову крейсерську висоту; розшифруй необроблені повідомлення і перевір їхній CRC власним кодом. А потім постав запитання, які система порушує, але на які не відповідає: повідомлення не підписані - то що заважає комусь транслювати літак-привид? Літак залежить від супутників, сигнал яких можна заглушити, - то що бачить диспетчер, коли це стається? А дані ідентифікують літаки, які можуть ідентифікувати людей, - то хто повинен мати змогу стежити за ким?

Завдання

Спершу розв'яжи кожне на папері. Перевірка покаже відповідь і хід міркувань.

- 1. 1. Яка довжина хвилі сигналу на 1090 MHz і якої довжини для нього чвертьхвильова антена?**

2. 2. У скільки разів повідомлення швидше за звук? Літак за 30 km випромінює і те, і те одночасно; скільки він пролетить, поки дійде звук?

3. 3. Годинник приймача помиляється на 2 мікросекунди. Яку похибку дальності це спричиняє і чому супутниковому приймачу потрібні чотири супутники, а не три?

4. 4. Скільки літаків можна ідентифікувати 24 бітами адреси? Скільки триває 112-бітне повідомлення зі швидкістю 1 біт за мікросекунду і вся передача разом із преамбулою?

5. 5. Які формат низхідної лінії та можливості в повідомленні 8D4840D6... і яка адреса ICAO?

6. 6. Приймальна антена розташована на висоті 15 m. Який радіогоризонт для літака на висоті 9 000 m і для літака на 300 m?

7. 7. Чому подвоєння відстані зменшує прийняту потужність учетверо? Які втрати на трасі на відстані 200 km і як вони співвідносяться зі 145 dB на 400 km?

8. 8. Передбач, що станеться з дальністю, якщо антену покласти горизонтально, і якщо приймач перенести з даху на перший поверх.

ДАЛІ

Збери його

Усе, про що йдеться в цих уроках, можна перевірити з вікна. Практикум дає тобі список покупок (близько 100-150 євро або Raspberry Pi, який у тебе вже є), яку антену обрати і де її поставити, три команди, що встановлюють фідер Dataero, і вимірювання, які перевіряють формули на справжніх літаках: радіогоризонт, закон обернених квадратів, добовий ритм. Коли твій приймач передаватиме дані на карту, кожен літак, якого він чує, буде намальовано для всіх - з назвою твоєї станції.

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

Відповіді

1. 1. Яка довжина хвилі сигналу на 1090 MHz і якої довжини для нього чвертьхвильова антена?
 $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275 \text{ m}$. Чвертьхвильовий елемент має довжину 6,9 см.
Незмінна швидкість світла змушує частоту і довжину хвилі бути обернено пропорційними.
2. 2. У скільки разів повідомлення швидше за звук? Літак за 30 km випромінює і те, і те одночасно; скільки він пролетить, поки дійде звук?
 $3,00 \times 10^8 / 343 = \text{приблизно в } 875\,000 \text{ разів}$. Повідомлення надходить за 100 мікросекунд, звук - за 87 s, за які літак зі швидкістю 250 m/s пролітає 22 km.
3. 3. Годинник приймача помиляється на 2 мікросекунди. Яку похибку дальності це спричиняє і чому супутниковому приймачу потрібні чотири супутники, а не три?
 $2 \times 10^{-6} \text{ s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 600 \text{ m}$. Три супутники визначають x, y і z, лише якщо годинник ідеальний; зсув годинника - четверта невідома, тож потрібен четвертий супутник.
4. 4. Скільки літаків можна ідентифікувати 24 бітами адреси? Скільки триває 112-бітне повідомлення зі швидкістю 1 біт за мікросекунду і вся передача разом із преамбулою?
 $2^{24} = 16\,777\,216$. Дані тривають 112 мікросекунд; разом із 8-мікросекундною преамбулою - 120 мікросекунд.
5. 5. Які формат низхідної лінії та можливості в повідомленні 8D4840D6... і яка адреса ICAO?
8D = 1000 1101. Перші п'ять бітів 10001 = 17: DF 17, ADS-B від транспондера Mode S. Наступні три біти 101 = 5: CA 5. Адреса ICAO - 4840D6, виділена Нідерландам.
6. 6. Приймальна антена розташована на висоті 15 m. Який радіогоризонт для літака на висоті 9 000 m і для літака на 300 m?
 $d = 4,12 \times (\sqrt{15} + \sqrt{9000}) = 4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407 \text{ km}$. Для 300 m: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87 \text{ km}$.
7. 7. Чому подвоєння відстані зменшує прийняту потужність учетверо? Які втрати на трасі на відстані 200 km і як вони співвідносяться зі 145 dB на 400 km?
Випромінена потужність розподіляється по сфері площею $4 \pi d^2$, яка на подвоєній відстані вчетверо більша. На 200 km: $20 \log_{10}(200) + 20 \log_{10}(1090) + 32,44 = 46,0 + 60,7 + 32,4 = 139 \text{ dB}$, на 6 dB (учетверо) менше, ніж на 400 km.
8. 8. Передбач, що станеться з дальністю, якщо антену покласти горизонтально, і якщо приймач перенести з даху на перший поверх.
Горизонтально: поляризація антени перпендикулярна до вертикальної хвилі; наведений струм залежить від складової поля вздовж провідника, тож антена чує дуже мало. Перший поверх: член горизонту $4,12 \sqrt{h_1}$ зменшується, а будівлі перекривають лінію видимості, тож дальність різко падає, особливо для низьких літаків.