

ФИЗИКА И ИНФОРМАТИКА - ОТ 12 ДО 18 ЛЕТ

Расшифровать небо

Строка шестнадцатеричных цифр ниже - настоящее сообщение, посланное настоящим самолётом примерно дважды в секунду. За 112 миллионных долей секунды оно объявляет, кто этот самолёт, а в сообщениях-спутниках - где он, как высоко и как быстро. Этот курс проходит через всё, что нужно, чтобы его понять: физику волны, на которой оно летит, измерение времени, которое даёт самолёту положение, кодирование, которое упаковывает его в 112 бит, геометрию, которая ограничивает дальность приёма, и приёмник, который ты можешь собрать, чтобы услышать его сам.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Что такое ADS-B на одной странице

УРОК 1 Волна: радио как невидимый свет

УРОК 2 Время и положение: как самолёт знает, где он

УРОК 3 Сообщение: 112 бит и как ловятся ошибки

УРОК 4 Дальность: кривизна Земли и закон обратных квадратов

УРОК 5 Антенны и приёмники: от волны в 27 сантиметров до точки на карте

Задачи

ДАЛЬШЕ Собери его

Что такое ADS-B на одной странице

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

Один расширенный сквиттер, каким его записывает приёмник: 28 шестнадцатеричных цифр, 112 бит. К уроку 3 ты сможешь прочитать каждое его поле.

Служба управления воздушным движением должна непрерывно знать, где каждый самолёт, чтобы разводить их: авиалайнер на крейсерском режиме проходит 250 м каждую секунду, а правила эшелонирования требуют 300 м по вертикали или 9 км по горизонтали между самолётами под радиолокационным контролем. Семьдесят лет способом это знать был радар: наземная станция посылает импульс и замеряет время эха или, в усовершенствованном вторичном варианте, запрашивает транспондер на самолёте, который отвечает на 1090 МГц кодом и высотой. У радара есть пределы: ему нужна огромная мощность, он видит каждый самолёт лишь раз за оборот антенны и не может покрыть океаны и горы.

ADS-B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (автоматическое зависимое наблюдение - радиовещательное), переворачивает задачу. Каждый современный самолёт несёт приёмник спутниковой навигации и потому знает своё положение с точностью до нескольких метров. ADS-B просто заставляет транспондер самолёта объявлять это положение вместе с его

идентификатором, высотой и скоростью, примерно дважды в секунду, на 1090 МГц, никому конкретно. Автоматическое, потому что ничто его не запускает; зависимое, потому что информация целиком берётся из собственных приборов самолёта; наблюдение, потому что его цель - знать, где самолёты; радиовещание, потому что оно передаётся открыто всем, кто слушает. С 2020 года оно обязательно для большинства самолётов в европейском и американском воздушном пространстве. Диспетчеры используют его вместе с радаром, другие самолёты видят с его помощью друг друга, а USB-приёмник за 25 евро на крыше школы слышит в точности те же сообщения.

Чтобы понять систему, нужно понять пять вещей, и каждая - отдельный урок: электромагнитная волна, которая несёт сообщение; измерение времени, которое даёт самолёту положение и позволяет сети найти самолёт, который не говорит, где он; цифровое сообщение и то, как в нём ловятся ошибки; геометрия и энергия, ограничивающие дальность приёма; и антенна с приёмником, которые превращают его обратно в данные. Полное изложение - в базовом курсе; прочитай его главы 3 и 5 перед уроком 3 и главы с 6 по 8 перед уроками 4 и 5.

УРОК 1

Волна: радио как невидимый свет

Сообщение покидает самолёт в виде электромагнитной волны: колеблющиеся электрические и магнитные поля, распространяющиеся в пространстве без всякой среды со скоростью света $c = 3,00 \times 10^8$ м/с. Видимый свет - то же явление на более высокой частоте; твои глаза отзываются примерно на $4\text{--}8 \times 10^{14}$ Гц, тогда как ADS-B передаётся на $1,09 \times 10^9$ Гц, в полмиллиона раз ниже. Между сообщением самолёта и светом этого экрана нет различия по природе - только по частоте.

Поскольку волна движется с постоянной скоростью, её частота определяет длину волны. За одну секунду волна продвигается на c метров и совершает f циклов, так что каждый цикл занимает c / f метров: $c = f \times \lambda$. Для ADS-B $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ м. У волны, проходящей между самолётом и твоей антенной, гребни расположены через 27,5 см - на спектре между сигналом мобильного телефона (17 см) и FM-радиостанцией (3 м). Нарисуй этот спектр сам, на логарифмической оси от 10^6 Гц до 10^{18} Гц, и помести на него FM-радио, ADS-B, мобильные телефоны, Wi-Fi, инфракрасное излучение, видимый свет и рентгеновские лучи. Волна самолёта сидит среди вещей из твоего кармана.

$$c = f \times \lambda$$

$$3,00 \times 10^8 \text{ м/с} = 1,09 \times 10^9 \text{ Гц} \times 0,275 \text{ м}$$

Чем радиоволна не является, так это звуком. Звук - волна давления в среде, движущаяся со скоростью 343 м/с в воздухе, 1 500 м/с в воде и никак - в вакууме. Радио - это свет: ему не нужна среда, и именно поэтому оно пересекает вакуум от спутника до самолёта, и оно быстрее в $3,00 \times 10^8 / 343$, то есть примерно в 875 000 раз. Если самолёт в 30 км издаёт звук и посылает сообщение в один и тот же миг, сообщение приходит через 100 микросекунд; звук приходит через 87 секунд, к этому времени самолёт пролетел 22 км. У волны на верёвке со светом общие те

свойства, которые важны, - длина волны, частота и постоянная скорость, так что более быстрая тряска означает более короткие волны, а не более быстрые; отличается она тем, что ей нужна верёвка.

Одно свойство волны понадобится в уроке 5: её поляризация. Электрическое поле колеблется в определённом направлении, перпендикулярном направлению движения. Антенны самолётов вертикальны, поэтому волна ADS-B вертикально поляризована, и приёмная антенна, положенная на бок, почти ничего из неё не перехватывает - как волну на верёвке, которую трясут вертикально, останавливает горизонтальная щель. Предскажи уже сейчас, что случится с дальностью твоего приёмника, если антенна будет горизонтальной; в проекте ты это проверишь.

УРОК 2

Время и положение: как самолёт знает, где он

Положение в каждом сообщении ADS-B берётся из спутниковой навигации, а спутниковая навигация - это измерение времени. Около тридцати спутников в каждой системе (GPS, Galileo, ГЛОНАСС, BeiDou) обращаются на высоте примерно 20 200 км, у каждого атомные часы, каждый передаёт сигнал с указанием собственного положения и точного момента передачи. Приёмник на самолёте отмечает момент прихода. Разность, умноженная на c , - расстояние до этого спутника; от спутника прямо над головой сигнал идёт $20\,200 / 300\,000 = 0,0673$ с. Одно расстояние помещает приёмник на сферу вокруг этого спутника; две сферы пересекаются по окружности; три - в двух точках, одна из которых далеко от Земли и отбрасывается. Трёх спутников хватило бы, будь у приёмника идеальные часы. У него кварцевый кристалл, который уходит на микросекунды, а одна микросекунда - это 300 м дальности. Поэтому приёмник рассматривает ошибку собственных часов как четвертую неизвестную и использует четвертый спутник: четыре уравнения, четыре неизвестных (x , y , z и сдвиг часов), решаемые непрерывно. Как побочный продукт каждый спутниковый приёмник держит время с точностью до десятков наносекунд, и на этом строится вторая половина урока.

Держи в уме порядки величин: свет проходит 0,3 м за наносекунду и 300 м за микросекунду. Положение с точностью до 3 м означает время с точностью до 10 нс. Спутник, часы которого спешили бы на 1 микросекунду, сдвинул бы каждый использующий его приёмник на 300 м вдоль линии к себе, поэтому часы спутников корректируют с земли несколько раз в день.

Самолёт несёт две высоты. Спутниковое решение даёт геометрическую высоту над референц-эллипсоидом. Но высота, которую он передаёт для целей управления воздушным движением, барометрическая: давление воздуха у отверстия на фюзеляже, переведённое в высоту через Международную стандартную атмосферу, которая принимает 1013,25 гПа и 15 градусов Цельсия на уровне моря и падение на 6,5 градуса на километр. Когда реальное давление отличается от стандартного, барометрическая высота каждого самолёта ошибочна на одну и ту же величину, а это ровно то, что нужно для эшелонирования: два самолёта с показаниями эшелонов 350 и 360 разделены 1 000 футами в любую погоду. Сообщение о положении несёт барометрическую высоту с шагом 25 футов; сообщение о скорости несёт разность между барометрической и геометрической высотой. Если у тебя есть электронная таблица, обрати $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ и проверь, что на 11 000 м давление около 227 гПа, меньше четверти от уровня моря: воздух, в котором летит авиалайнер, не удержал бы тебя в сознании.

Теперь переверни всю идею. Некоторые самолёты передают на 1090 МГц без положения: старые транспондеры, отвечающие радару только кодом и высотой, или самолёты, у которых спутниковый приём заглушён. Сеть приёмников всё равно может найти их мультилатерацией. Пусть четыре приёмника с синхронизированными часами каждый фиксируют время прихода одной и той же передачи. Сообщение, дошедшее до приёмника А на одну микросекунду раньше, чем до приёмника В, было послано из точки, которая на 300 м ближе к А, чем к В, и все такие точки образуют гиперboloид с фокусами в А и В. Три независимые пары из четырёх приёмников дают три гиперboloида, которые пересекаются в самолёте. Это спутниковая задача, в которой известное и неизвестное поменялись местами: там один приёмник и четыре известных передатчика; здесь один передатчик и четыре известных приёмника. И там и там измеряется время, и 1 микросекунда - это 300 м. Приёмники синхронизируют свои часы примерно до 100 нс по тем же спутникам, которыми пользуется самолёт.

Это можно сделать со звуком. Трое с секундомерами в измеренных точках на спортивном поле; четвёртый, спрятавшись, хлопает один раз; каждый записывает задержку. Со звуком на 343 м/с разница в 0,1 с - это 34 м, и масштабный чертёж с пробными положениями или набросок гипербол находит хлопавшего. Потом спроси, какая точность потребовалась бы секундомерам, чтобы сделать то же самое с радио на 200 км, и ты поймёшь, зачем сети атомное время.

УРОК 3

Сообщение: 112 бит и как ловятся ошибки

Транспондер посылает ADS-B в виде расширенного сквиттера Mode S: 8-микросекундная преамбула, затем 112 бит данных со скоростью один бит в микросекунду. Преамбула - фиксированный узор из четырёх импульсов в моменты 0, 1, 3,5 и 4,5 микросекунды, и её работа - ответить на вопрос, который ты, возможно, не додумался задать: в канале, полном шума и других самолётов, как приёмник узнаёт, что сообщение началось и когда начинается каждый бит? Декодер непрерывно следит за этим узором и, увидев его, знает и то и другое. У каждого цифрового протокола, которым ты пользуешься, от Wi-Fi до QR-кода, есть свой эквивалент.

Передатчик может быть включён или выключен; как он посылает 1 или 0? ADS-B использует позиционно-импульсную модуляцию. Каждый битовый интервал в одну микросекунду делится на половины: импульс в первой половине и тишина во второй - это 1; тишина, а потом импульс - это 0. На каждый бит всегда приходится ровно один импульс. Подумай, чем это лучше, чем «импульс - 1, нет импульса - 0». Приёмник никогда не теряет синхронизацию, даже на длинной серии нулей, которая в наивной схеме была бы неотличима от тишины. И каждый бит он определяет, спрашивая, какая половина была громче, а не превысил ли импульс некий фиксированный уровень, так что слабый сигнал с 400 км декодируется так же надёжно, как сильный из-над головы.

Четыре бита в позиционно-импульсной модуляции: 1, 0, 1, 1



Каждый интервал - 1 микросекунда. Импульс в первой половине: 1. Импульс во второй половине: 0.

112 бит расположены следующим образом, и ты должен уметь воспроизвести это по памяти. Биты с 1 по 5: формат нисходящего канала, 17 для ADS-B от транспондера. Биты с 6 по 8: код возможностей. Биты с 9 по 32: 24-битный адрес ICAO, постоянный идентификатор самолёта, присваиваемый при регистрации; существует $2^{24} = 16\,777\,216$ адресов, выделяемых государствам блоками, у Бельгии это от 448000 до 44FFFF в шестнадцатеричной записи. Биты с 33 по 88: 56-битное поле сообщения, первые пять бит которого, код типа, говорят, что содержат остальные 51. Коды типов с 1 по 4 несут позывной в виде восьми 6-битных символов, по 64 знака каждый. Коды типов с 9 по 18 несут положение в воздухе: 12 бит барометрической высоты с шагом 25 футов, флаг чётности и по 17 бит закодированной широты и долготы. Код типа 19 несёт скорость в виде составляющих путевой скорости восток-запад и север-юг, вертикальной скорости и разности барометрической и геометрической высот. Биты с 89 по 112: 24-битная контрольная сумма. Проверь арифметику: 12 бит высоты с шагом 25 футов покрывают 102 400 футов; 17 бит, использованных наивно на 180 градусах широты, разрешали бы лишь 1,4 км. Положение точнее благодаря компактному представлению положения: 17 бит дают положение внутри зоны с точностью до нескольких метров, но не саму зону, а самолёт чередует две сетки зон, чётную и нечётную. Приёмник, услышавший по одному сообщению каждого вида, однозначно определяет зону и дальше следит по одиночным сообщениям. Больше точности из тех же бит, купленной временем.

DF	CA	адрес ICAO	ME - полезная нагрузка	PI
5 бит	3 бит	24 бит	56 бит	24 бит
формат нисходящего канала	возможности	уникальный идентификатор самолёта	положение, высота, скорость, позывной или статус - в зависимости от кода типа в первых 5 битах	проверка ошибок (CRC)

Препарируй настоящее сообщение с начала этой страницы. 8D4840D6202CC371C32CE0576098 - это 28 шестнадцатеричных цифр, 112 бит. Первые две цифры, 8D, - это 1000 1101 в двоичной записи; первые пять бит, 10001, - это 17, значит, это ADS-B от транспондера, а следующие три, 101, дают возможности 5. Следующие шесть цифр, 4840D6, - адрес ICAO, который таблицы распределения относят к Нидерландам. Следующая пара цифр, 20, начинается с 00100, код типа 4, сообщение опознавания, и декодирование последующих 6-битных символов даёт позывной KLM1023. Последние шесть цифр, 576098, - контрольная сумма. С электронной таблицей или несколькими строками кода ты можешь выполнить всё декодирование, и умение взглянуть на строку шестнадцатеричных цифр и сказать «самолёт KLM объявляет рейс 1023» - цель этого урока.

Контрольная сумма заслуживает больше всего размышлений. Над оживлённым аэропортом передачи разных самолётов постоянно накладываются друг на друга в приёмнике, а отдельные импульсы теряются из-за шума; декодер неизбежно будет иногда собирать неверные биты. Последние 24 бита - циклический избыточный код: 88 бит сообщения рассматриваются как одно длинное двоичное число и делятся, в арифметике, где вычитание - это исключающее ИЛИ, на фиксированный 25-битный порождающий многочлен; остаток и есть CRC. Приёмник повторяет деление над декодированными битами. Любой один перевёрнутый бит, любые два и любой пакет ошибок длиной до 24 бит меняют остаток, и сообщение отбрасывается. Попробуй 4-битный CRC над 8-битным сообщением вручную, чтобы увидеть механизм, а потом, если программируешь, реализуй настоящий CRC-24 и убедись, что сообщение из примера проходит проверку, а переворот любого одного бита делает её неверной. Это обнаружение ошибок так, как его делает каждая современная система, в контексте, где пропущенная ошибка могла бы поставить призрак самолёт на экран диспетчера.

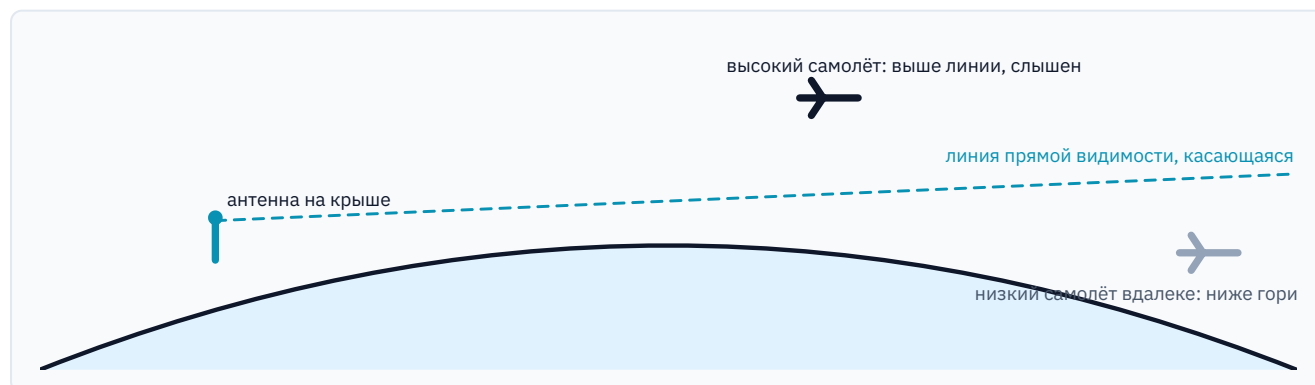
УРОК 4

Дальность: кривизна Земли и закон обратных квадратов

Как далеко приёмник может услышать самолёт? Действуют два разных предела, и их стоит держать порознь. Первый - геометрический. На 1090 МГц радиоволна не огибает Землю; она движется по прямой, поэтому приёмник слышит только самолёты выше своего горизонта - те, от которых прямая к антенне не задевает землю. Выведи расстояние до горизонта. Антенна на высоте h над сферой радиуса R видит горизонт там, где её линия визирования касается сферы; касательная и два радиуса образуют прямой угол в точке касания, так что $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, откуда $d^2 = 2Rh + h^2$, а поскольку h пренебрежимо мало по сравнению с R , $d = \sqrt{2Rh}$. При $R = 6\,371$ км и h в метрах d (км) $= 3,57 \sqrt{h}$. Атмосфера слегка отклоняет радиоволны вниз, потому что её показатель преломления падает с высотой; стандартная поправка рассматривает Землю так, как если бы её радиус был на треть больше истинного, заменяя 3,57 на 4,12. Полная линия прямой видимости от антенны на высоте h_1 до самолёта на высоте h_2 - сумма двух расстояний до горизонта:

$$d \text{ (км)} = 4.12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad h_1, h_2 \text{ в метрах}$$

Антенна на крыше высотой 20 м, самолёт на 11 000 м: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451$ км. Та же антенна, самолёт на 1 000 м: 149 км. Самолёт на полосе в 30 км: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27$ км, значит, молчит.



Построй график d от h^2 для высоты своей антенны. Кривая сначала крутая, потом выполаживается, и она объясняет форму покрытия любого приёмника: 400 км и больше для крейсерского трафика, несколько десятков километров для самолётов на заходе, ничего на земле, кроме аэропорта по соседству. Она объясняет, почему высота - самое важное свойство приёмника и почему холм, здание или собственное крыло самолёта, когда он кренился от тебя, могут мгновенно оборвать трек.

Второй предел - энергия. Транспондер излучает несколько сотен ватт, примерно равномерно во всех горизонтальных направлениях. На расстоянии d эта мощность распределена по сфере площадью $4\pi d^2$, поэтому мощность, перехватываемая антенной с фиксированной эффективной площадью, падает как $1/d^2$: закон обратных квадратов, который тебе стоит вывести из площади сферы, а не заучить. Вдвое дальше - четверть мощности; в десять раз - сотая часть. Инженеры выражают потери в децибелах, где 10 дБ - это множитель десять по мощности, а 3 дБ - множитель два, потому что децибелы превращают умножение через много порядков в сложение. Потери в свободном пространстве между двумя простыми антеннами таковы:

$$\text{потери на трассе (дБ)} = 20 \log_{10}(d \text{ в км}) + 20 \log_{10}(f \text{ в МГц}) + 32.44$$

На 400 км и 1090 МГц: $52,0 + 60,7 + 32,4 = 145$ дБ. Передатчик 250 Вт - это +54 дБм; принятая мощность $54 - 145 = -91$ дБм, около 8×10^{-13} Вт.

На этом числе стоит задержаться: приёмник на крыше обнаруживает сигнал в $10^{14,5}$ раз слабее того, что покинул самолёт, - миллионную долю миллионной доли ватта. Хороший любительский приёмник декодирует примерно до -100 дБм, так что на 400 км в запасе 9 дБ. Иными словами, энергетический предел и геометрический горизонт для авиалайнера на крейсерском режиме попадают в одно и то же место, и это сделано намеренно: мощность транспондера и требования к приёмникам заданы так, чтобы самолёт был слышен до своего горизонта и не намного дальше, что не даёт каналу захлебнуться трафиком из соседней страны.

Два уточнения. Доплер: самолёт, приближающийся со скоростью 250 м/с, сдвигает принимаемую частоту на $f v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Гц, меньше одной миллионной, чего приёмник никогда не замечает; сравни со звуком того же самолёта, где v / c равно $250 / 343$ и высота тона при пролёте падает почти на октаву. И время распространения: 400 км со скоростью c - это 1,33 мс, так что переданное положение к моменту прихода уже устарело на 1,33 мс, за которые самолёт сместился на 33 см; пренебрежимо для карты, решающе для мультilaterации, которая живёт именно на этих микросекундах.

УРОК 5

Антенны и приёмники: от волны в 27 сантиметров до точки на карте

Антенна - это проводник, в котором проходящая электромагнитная волна наводит переменный ток, а то же устройство, питаемое током, запускает волну; приёмная и передающая антенны - одно и то же, работающее в обратную сторону. Наведённый ток наибольший при резонансе, когда длина проводника позволяет распределению тока вдоль него совпасть с колебаниями волны, как струна нужной длины резонирует с определённой нотой. Основной резонанс прямого проводника

- на половине длины волны, 13,75 см на 1090 МГц, с наибольшим током в центре и нулевым на концах. Практическая антенна ADS-B, на самолётах и на большинстве приёмников, - четвертьволновой штырь: вертикальный элемент длиной 6,9 см на проводящем противовесе, который зеркалит его, так что элемент и его отражение вместе образуют полуволновой диполь. На самолёте противовес - фюзеляж; покупная антенна на 1090 МГц прячет ту же геометрию внутри своей трубки, повторённую несколько раз. Самодельную антенну расстраивают несколько миллиметров ошибки, и она слышит лишь малую долю неба - поэтому приёмник проекта использует антенну, настроенную на заводе.

Вертикальный штырь наиболее чувствителен в сторону горизонта и совсем не чувствителен вдоль собственной оси; его чувствительность в трёх измерениях - бублик, сквозь дырку которого проходит антенна. Поэтому твой приёмник будет прекрасно слышать самолёты в 300 км и на несколько секунд терять тот, что проходит прямо над головой, и ты можешь это увидеть. Коллинеарная антенна - несколько резонансных элементов, поставленных друг на друга, - сплющивает бублик и повышает чувствительность у горизонта ценой дыры над головой: это усиление антенны, измеряемое в дБи, и оно получается перераспределением чувствительности, а не её созданием. И, как следует из урока 1, антенна должна быть вертикальной, потому что волна вертикально поляризована.

Между антенной и точкой на карте - четыре ступени. Полосовой фильтр пропускает 1090 МГц и отбрасывает несравненно более сильные сигналы мобильных телефонов в нескольких сотнях мегагерц, которые иначе насытили бы всё, что стоит после него. Малошумящий усилитель у антенны умножает сигнал в тысячу раз перед кабелем, который на 1090 МГц теряет около 3 дБ, половину сигнала, на каждом десяти метрах; усиль после кабеля - и усилишь заодно шум кабеля. Программно определяемое радио, USB-устройство за 20 евро, изначально продававшееся как телевизионный тюнер, переносит сигнал вниз по частоте и отбирает его значения два миллиона раз в секунду в поток чисел. Дальше - программирование: свободная программа просматривает отсчёты в поисках преамбулы, измеряет, какая половина каждого микросекундного интервала несёт больше энергии, собирает 112 бит, вычисляет CRC и, если он сходится, декодирует поля. Трекер затем объединяет чётные и нечётные кадры положения, сводит положение, скорость и идентификатор по адресу ICAO и хранит состояние каждого самолёта, пока сообщения не перестанут приходить - обычно потому, что он ушёл за горизонт.

Нарисуй эту цепочку с величиной на каждой ступени: нановольты на антенне, микровольты после усилителя, два миллиона отсчётов в секунду на выходе радио, несколько сотен кадров в секунду на выходе декодера, одна запись на самолёт на выходе трекера. Точка на карте - дальний конец цепочки, в которой каждое звено - идея из этого курса: резонанс, фильтрация, усиление, дискретизация, поиск узора, декодирование, проверка ошибок, агрегация. Проект - собрать эту цепочку и проверить курс по небу: измерь свою максимальную дальность в зависимости от высоты и сравни с формулой горизонта; сравни антенну в помещении, у окна и на крыше, вертикальную и горизонтальную; запиши день трафика и найди самый загруженный час и типичную крейсерскую высоту; декодируй сырые сообщения и проверь их CRC в собственном коде. А потом задай вопросы, которые система ставит и на которые не отвечает: сообщения не подписаны, так что мешает кому-то передать призрачный самолёт; самолёт зависит от спутников,

которые можно заглушить, так что видит диспетчер, когда это случается; а данные идентифицируют самолёты, которые могут идентифицировать людей, так кто должен иметь право следить за кем.

Задачи

Сначала реши каждую на бумаге. Проверка показывает ответ и рассуждение.

1. 1. Какова длина волны сигнала 1090 МГц и какой длины четвертьволновая антенна для него?

2. 2. Во сколько раз сообщение быстрее звука? Самолёт в 30 км издаёт и то и другое одновременно; сколько он пролетел к моменту, когда приходит звук?

3. 3. Часы приёмника ошибаются на 2 микросекунды. Какую ошибку дальности это вызывает и почему спутниковому приёмнику нужны четыре спутника, а не три?

4. 4. Сколько самолётов могут идентифицировать 24 бита адреса? Сколько длится 112-битное сообщение при 1 бите в микросекунду и сколько - вся передача с преамбулой?

5. 5. В сообщении 8D4840D6... каковы формат нисходящего канала и возможности и каков адрес ICAO?

6. 6. Приёмная антенна на высоте 15 м. Каков радиогоризонт до самолёта на 9 000 м и до самолёта на 300 м?

7. 7. Почему удвоение расстояния уменьшает принятую мощность вчетверо? Каковы потери на трассе на 200 км и как они соотносятся со 145 дБ на 400 км?

8. 8. Предскажи, что случится с дальностью, если антенну положить горизонтально и если приёмник перенести с крыши на первый этаж.

ДАЛЬШЕ

Собери его

Всё, о чём рассказано в этих уроках, можно проверить из окна. Практикум даёт тебе список покупок (около 100-150 евро или Raspberry Pi, который у тебя уже есть), какую антенну выбрать и куда её поставить, три команды, которые устанавливают фидер Dataero, и измерения, которые проверяют формулы по настоящим самолётам: радиогоризонт, закон обратных квадратов, суточный ритм. Когда твой приёмник кормит карту, каждый самолёт, который он слышит, рисуется для всех, с именем твоей станции.

Открыть практикум <https://radar.dataero.eu/ru/learning/workshop>

Ответы

1. Какова длина волны сигнала 1090 МГц и какой длины четвертьволновая антенна для него?
 $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ м. Четвертьволновой элемент - 6,9 см. Постоянная скорость света навязывает обратную зависимость между частотой и длиной волны.
2. Во сколько раз сообщение быстрее звука? Самолёт в 30 км издаёт и то и другое одновременно; сколько он пролетел к моменту, когда приходит звук?
 $3,00 \times 10^8 / 343 =$ примерно в 875 000 раз. Сообщение приходит через 100 микросекунд, звук через 87 с, за которые самолёт на 250 м/с пролетает 22 км.
3. Часы приёмника ошибаются на 2 микросекунды. Какую ошибку дальности это вызывает и почему спутниковому приёмнику нужны четыре спутника, а не три?
 $2 \times 10^{-6} \text{ с} \times 3 \times 10^8 \text{ м/с} = 600$ м. Три спутника определяют x, y и z, только если часы идеальны; сдвиг часов - четвёртая неизвестная, поэтому нужен четвёртый спутник.
4. Сколько самолётов могут идентифицировать 24 бита адреса? Сколько длится 112-битное сообщение при 1 бите в микросекунду и сколько - вся передача с преамбулой?
 $2^{24} = 16\,777\,216$. Данные длятся 112 микросекунд; с 8-микросекундной преамбулой - 120 микросекунд.
5. В сообщении 8D4840D6... каковы формат нисходящего канала и возможности и каков адрес ICAO?
8D = 1000 1101. Первые пять бит 10001 = 17: DF 17, ADS-B от транспондера Mode S. Следующие три бита 101 = 5: CA 5. Адрес ICAO - 4840D6, выделен Нидерландам.
6. Приёмная антенна на высоте 15 м. Каков радиогоризонт до самолёта на 9 000 м и до самолёта на 300 м?
 $d = 4,12 \times (\sqrt{15} + \sqrt{9000}) = 4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407$ км. Для 300 м: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87$ км.
7. Почему удвоение расстояния уменьшает принятую мощность вчетверо? Каковы потери на трассе на 200 км и как они соотносятся со 145 дБ на 400 км?
Переданная мощность распределяется по сфере площадью $4 \pi d^2$, которая на вдвое большем расстоянии вчетверо больше. На 200 км: $20 \log_{10}(200) + 20 \log_{10}(1090) + 32,44 = 46,0 + 60,7 + 32,4 = 139$ дБ, на 6 дБ (множитель четыре) меньше, чем на 400 км.
8. Предскажи, что случится с дальностью, если антенну положить горизонтально и если приёмник перенести с крыши на первый этаж.
Горизонтально: антенна кросс-поляризована относительно вертикальной волны; наведённый ток зависит от составляющей поля вдоль проводника, поэтому она слышит очень мало. Первый этаж: слагаемое горизонта $4,12 \sqrt{h_1}$ сокращается, а здания заслоняют линию прямой видимости, поэтому дальность резко падает, особенно для низких самолётов.