

ОТ 12 ДО 18 ЛЕТ - ДЛЯ УЧИТЕЛЯ

Расшифровать небо: физика и информатика на одной реальной системе

Пять уроков и проект. Каждый урок берёт одну часть ADS-B и полностью разворачивает стоящую за ней физику или информатику: выводы там, где класс может за ними проследить, разобранные примеры с настоящими числами, демонстрации, которые делают идею наблюдаемой, и те места, где интуиция учеников ошибается. Младшая часть диапазона (12-14 лет) следует за идеями и арифметикой; старшая (15-18 лет) следует за выводами и выполняет проект.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Прежде чем начать: почему одна реальная система стоит пяти уроков

УРОК 1 - ФИЗИКА Волны и электромагнитный спектр: на чём летит сообщение

УРОК 2 - ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА Время и положение: как самолёт знает, где он, и как сеть находит тот, что не говорит

УРОК 3 - ИНФОРМАТИКА Цифровое сообщение: 112 бит, как они передаются и как ловятся ошибки

УРОК 4 - ФИЗИКА Распространение и дальность: кривизна Земли и закон обратных квадратов

УРОК 5 - ФИЗИКА И ИНЖЕНЕРИЯ Антенны и приёмники: от волны в 27 сантиметров до точки на карте

ПРОЕКТ - ОТ ДВУХ ДО ЧЕТЫРЁХ НЕДЕЛЬ Соберите приёмник и проверьте физику по небу

Ответы на задачи для ученика

ДАЛЬШЕ Проект, шаг за шагом

Прежде чем начать: почему одна реальная система стоит пяти уроков

Большая часть физики, которую преподают с 12 до 18 лет, преподаётся кусками: раздел о волнах здесь, об электромагнитном спектре там, тема о цифровых данных в информатике, упоминание спутников в географии. ADS-B - единая работающая система, в которой все эти куски несут нагрузку одновременно и результат которой класс может наблюдать с помощью приёмника дешевле учебника. Самолёт определяет своё положение, измеряя время прихода радиосигналов от спутников, - это трилатерация и скорость света. Он кодирует результат в 112 бит с циклическим избыточным кодом - это двоичное кодирование и обнаружение ошибок. Он передаёт их радиоволной с позиционно-импульсной модуляцией на 1090 МГц - это спектр, частота и длина волны. Волна достигает приёмника только по прямой, не задевающей кривизну Земли, и приходит ослабленной обратно пропорционально квадрату расстояния - это геометрия и энергия. Настроенная четвертьволновая антенна превращает её в ток - это резонанс. А сеть приёмников

может определить положение даже молчащего передатчика по разностям времён прихода - это спутниковая задача, вывернутая наизнанку. Каждый урок ниже берёт одну из этих тем и разворачивает её как самостоятельную, с ADS-B в роли сквозного примера, а не украшения.

Базовый курс на главной странице даёт всю систему в повествовательной форме, и классу следует прочитать его главы 3 и 5 перед уроком 3 и главы с 6 по 8 перед уроками 4 и 5; его глоссарий - полезная раздатка. Эта страница предполагает, что вы его прочли, и сосредоточена на физике и преподавании. Числовые соглашения едины на протяжении всего курса: $c = 3,00 \times 10^8$ м/с, $f = 1090$ МГц, высоты в метрах, расстояния в километрах, а самолёт на крейсерском режиме принимается на 11 000 м (эшелон 360) и 250 м/с, если в примере не сказано иное.

Два предупреждения об интуиции. Ученики приходят с убеждением, что радиоволны - вид звука и что «радар» или «спутники» видят самолёты. И то и другое неверно, и то и другое явно разбирается в уроках 1 и 2, и то и другое всплывёт снова; курс построен так, что каждый следующий урок даёт вам свежий повод их поправить. А ученики, которым удобно с формулами, часто чувствуют себя неуверенно с порядками величин: курс настойчиво спрашивает «а насколько это много?» на каждом шаге, потому что 300 м за микросекунду, 145 дБ потерь на трассе и 2^{24} адресов - те числа, от которых физика становится ощутимой.

УРОК 1 - ФИЗИКА

Волны и электромагнитный спектр: на чём летит сообщение

Начните с наблюдения, на котором держится весь курс: радиосообщение самолёта и луч света - одно и то же физическое явление. И то и другое - электромагнитные волны, колеблющиеся электрические и магнитные поля, распространяющиеся в пространстве без какой-либо среды со скоростью c , одинаковой для всех частот в вакууме и почти такой же в воздухе: 299 792 458 м/с, что класс может принять за $3,00 \times 10^8$ м/с. Величина, которая отличает радио от видимого света, а видимый свет от рентгеновских лучей, - только частота колебаний f . Наша сетчатка отзывается на частоты примерно от 4×10^{14} до 8×10^{14} Гц, которые мы воспринимаем как цвета от красного до фиолетового; ADS-B передаётся на $1,09 \times 10^9$ Гц, примерно в полмиллиона раз ниже. В самой волне нет никакого различия по природе; избирательны только наши глаза.

Выведите волновое уравнение для класса, а не формулируйте его. Если волна движется со скоростью c и колеблется f раз в секунду, то за одну секунду она продвинулась на расстояние c и произвела f полных циклов; значит, каждый цикл занимает длину c / f . Эта длина - длина волны λ , и потому $c = f \times \lambda$. В применении к ADS-B: $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ м. У сообщения между самолётом и приёмником гребни расположены через 27,5 см. Пусть класс поместит это на спектр, который нарисует сам, на логарифмической оси: FM-радиовещание на 100 МГц и 3 м, ADS-B на 1 090 МГц и 27,5 см, мобильные телефоны на 1 800 МГц и 17 см, Wi-Fi и микроволновые печи на 2 450 МГц и 12 см, инфракрасное излучение, видимый свет на $5,6 \times 10^{14}$ Гц и 540 нм, и так далее до рентгеновских лучей. Упражнение по размещению волны самолёта между телефоном и печью стоит больше любой таблицы, потому что оно показывает, что это соседи.

Теперь прямо разберитесь с путаницей со звуком, потому что она повсеместна и потому что контраст учит обоим явлениям. Звук - продольная волна давления в среде; его скорость - свойство среды: 343 м/с в воздухе при 20 градусах, около 1 500 м/с в воде и ноль в вакууме. Радио - поперечная электромагнитная волна, которой не нужна никакая среда, движущаяся со скоростью c в вакууме и неощутимо медленнее в воздухе. Дайте разрыву число: $3,00 \times 10^8$, делённое на 343, - это около 875 000. Самолёт в 30 км, который издаёт звук и посылает сообщение в один и тот же миг, доставляет сообщение за 100 микросекунд, а звук за 87 секунд; к моменту прихода звука самолёт пролетел 22 км. Демонстрация - верёвка в классе и фонарик через спортивную площадку: волне на верёвке явно нужна верёвка, и она бежит со скоростью, заданной верёвкой, а вспышка фонарика достигает дальнего конца без задержки, которую кто-либо мог бы измерить. Явно перечислите, что у верёвки общего со светом (волна, длина волны, частота, постоянная скорость и потому обратная зависимость между f и λ) и чего нет (среда, скорость в метры в секунду).

Закончите поляризацией: её дёшево показать, и она окупится в уроке 5. Электрическое поле электромагнитной волны колеблется в определённом направлении, перпендикулярном направлению её движения. Антенны транспондеров на самолётах вертикальны, поэтому волна ADS-B вертикально поляризована; приёмная антенна тоже должна быть вертикальной, а повернутая горизонтально, она почти ничего не слышит. Волна на верёвке, которую трясут вертикально, проходит через вертикальную щель в картонной коробке и останавливается горизонтальной; два куска поляризационной плёнки (из дешёвых 3D-очков), скрещённые на фоне окна, показывают то же самое для света. Попросите класс предсказать, что станет с приёмом, если приёмную антенну положить плашмя. Это предсказание они проверят в проекте.

Разобранный пример для задания

Вторая система ADS-B, которой пользуются лёгкие самолёты в Соединённых Штатах, передаёт на 978 МГц. Какова её длина волны и какой длины была бы четвертьволновая антенна для неё? (0,307 м; 7,7 см.) Ученик, который может это сделать, освоил урок 1.

УРОК 2 - ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА

Время и положение: как самолёт знает, где он, и как сеть находит тот, что не говорит

Всё, что самолёт передаёт о своём положении, берётся из спутниковой навигации, а спутниковая навигация - это, в основе своей, измерение времени. Каждый спутник GNSS, обращающийся на высоте около 20 200 км, несёт атомные часы и передаёт сигнал с указанием собственного положения и точного момента передачи. Приёмник отмечает момент прихода. Разность, умноженная на c , - расстояние до этого спутника, и одно такое расстояние помещает приёмник на сферу этого радиуса с центром в спутнике. Пусть класс сам выведет подсчёт: две сферы пересекаются по окружности, три - в двух точках, одна из которых далеко от поверхности Земли и может быть отброшена. Значит, трёх спутников достаточно - при идеальных часах в приёмнике. Ничего подобного у него нет; кварцевый генератор уходит гораздо сильнее, чем требуемые наносекунды. Решение, составляющее изящное сердце предмета, - рассматривать ошибку часов приёмника как четвертую неизвестную и использовать четвертый спутник: четыре уравнения с

четырьмя неизвестными (x, y, z и сдвиг часов), решаемые непрерывно. Поэтому приёмнику GNSS нужны четыре видимых спутника, и как побочный продукт он держит время с точностью до десятков наносекунд, - вот почему приёмники сети из урока 5 берут время для своих часов от тех же спутников, что и самолёт.

Выпишите порядки величин на доску и возвращайтесь к ним снова и снова. Свет проходит 0,300 м за наносекунду и 300 м за микросекунду. Ошибка времени в 1 микросекунду - это ошибка дальности в 300 м; точность современного приёмника в несколько метров соответствует измерению времени на уровне десяти наносекунд. Время распространения от спутника прямо над головой - $20\,200\text{ км} / 3,00 \times 10^8\text{ км/с} = 0,0673\text{ с}$, а от спутника у горизонта - около 0,086 с, так что приёмник измеряет разности в несколько миллисекунд с точностью до одной стомиллионной от них. Спросите класс, что случилось бы, если бы часы спутника спешили на одну микросекунду; они должны увидеть, что каждый приёмник, использующий его, был бы сдвинут примерно на 300 м вдоль линии к нему, и именно поэтому часы спутников корректируют с земли несколько раз в день.

Разделите две высоты, потому что сообщение несёт обе, а ученики всегда спрашивают. Спутниковое решение даёт геометрическую высоту над референц-эллипсоидом Земли. Тем не менее самолёты сообщают барометрическую высоту: статическое давление снаружи фюзеляжа, переведённое в высоту через Международную стандартную атмосферу, которая принимает 1013,25 гПа и 15 градусов на уровне моря и падение на 6,5 градуса на километр. В день, 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. Сообщения ADS-B о положении несут барометрическую высоту с шагом 25 футов; сообщение о скорости несёт разность между барометрической и геометрической высотой, так что приёмник может восстановить обе. Для старшей группы соотношение MCA $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ - хорошее упражнение для электронной таблицы: обратите его, чтобы найти h по p, и проверьте, что 11 000 м соответствует примерно 227 гПа, пятой части давления на уровне моря.

Теперь выверните задачу наизнанку. Некоторые самолёты передают на 1090 МГц без спутникового положения: старые транспондеры, отвечающие радару только кодом и высотой, или самолёты, у которых GNSS заглушена. Сеть приёмников всё равно может их найти. Пусть четыре приёмника с синхронизированными часами фиксируют время прихода одной и той же передачи. Передатчик неизвестен, приёмники известны: это задача GNSS, в которой известное и неизвестное поменялись ролями. Сообщение, пришедшее на приёмник A на одну микросекунду раньше, чем на приёмник B, было послано из точки, которая на 300 м ближе к A, чем к B, и геометрическое место таких точек - гиперboloид с фокусами в A и B. Три независимые пары из четырёх приёмников дают три гиперboloида, пересечение которых - самолёт. Это мультilaterация, и ей нужно согласие часов приёмников примерно до 100 нс, которое они получают от спутников. Для класса сведите её к двум измерениям упражнением на площадке: трое учеников с секундомерами в измеренных точках, четвёртый, спрятавшись где-то, хлопает, трое записывают задержки с поправкой на время реакции, и класс строит гиперболы (или, проще, перебирает пробные положения на масштабном чертеже), чтобы найти хлопавшего, используя

343 м/с. Потом спросите, какой должна была бы быть точность измерения времени, чтобы сделать то же самое с радио на 200 км, и дайте им почувствовать разрыв между секундомером и атомными часами.

Разобраный пример для задания

Два приёмника в 60 км друг от друга фиксируют сообщение с разницей в 50 микросекунд. Насколько ближе к первому приёмнику был самолёт? (На 15 км.) Если бы часы расходились друг относительно друга на 1 микросекунду, какую ошибку это внесло бы в ответ? (300 м.) Ученик, который может объяснить, почему второй ответ не зависит от расстояния, понял, чего требует мультилатерация.

УРОК 3 - ИНФОРМАТИКА

Цифровое сообщение: 112 бит, как они передаются и как ловятся ошибки

Транспондер самолёта посылает данные ADS-B в виде расширенного сквиттера Mode S: 8-микросекундная преамбула, за которой следуют 112 бит данных со скоростью ровно один бит в микросекунду. Начните урок с преамбулы, потому что она отвечает на вопрос, который ученики ещё не додумались задать: как приёмник узнаёт, что сообщение началось, если канал полон шума и других самолётов? Преамбула - фиксированный узор из четырёх импульсов в моменты 0, 1, 3,5 и 4,5 микросекунды. Декодер постоянно ищет этот узор; найдя его, он знает и то, что следует сообщение, и точно, когда начинается каждый битовый интервал. У каждого цифрового протокола, с которым ученики встречались, от Wi-Fi до QR-кода, есть свой эквивалент, и это хороший момент об этом сказать.

Затем модуляция. Радиопередатчик может быть включён или выключен; как послать 1 или 0? ADS-B использует позиционно-импульсную модуляцию: каждый битовый интервал в одну микросекунду делится на две половины, и импульс в первой половине, за которым следует тишина, означает 1, а тишина, за которой следует импульс, - 0. Нарисуйте несколько бит на доске в виде импульсов и дайте классу их прочитать. Потом спросите, чем это лучше очевидной схемы «импульс - 1, нет импульса - 0». С небольшой подсказкой всплывают две причины. На каждый бит всегда приходится ровно один импульс, так что приёмник удерживает синхронизацию даже на длинной серии нулей, и каждый бит он может определить, спросив, какая половина была громче, а не превысил ли импульс некий абсолютный порог, что делает декодирование нечувствительным к тому, насколько сильным оказался сигнал. Длинная серия нулей в наивной схеме была бы неотличима от тишины; в PPM это равная дробь импульсов во второй половине.

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



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

Теперь расположение 112 бит, которое класс должен уметь воспроизвести по памяти к концу урока. 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. Биты с 33 по 88 - 56-битное поле сообщения, первые пять бит которого, код типа, говорят, что содержат остальные 51: сообщение опознавания (коды типов с 1 по 4) несёт восьмисимвольный позывной в виде восьми 6-битных символов; положение в воздухе (с 9 по 18) несёт 12 бит барометрической высоты, флаг, говорящий, чётный это кадр или нечётный, и по 17 бит закодированной широты и долготы; сообщение о скорости (19) несёт составляющие путевой скорости восток-запад и север-юг, вертикальную скорость и разность барометрической и геометрической высот. Биты с 89 по 112 - 24-битная контрольная сумма. Задайте арифметику: 24 бита адреса дают $2^{24} = 16\,777\,216$ самолётов; восемь 6-битных символов допускают по 64 знака каждый, достаточно для букв, цифр и пробела; 12 бит высоты с шагом 25 футов покрывают 102 400 футов; а 17 бит широты, если использовать их наивно на 180 градусах, разрешали бы лишь 1,4 км, что ставит вопрос, на который отвечает компактное представление положения. Объясните CPR одним абзацем: 17 бит дают положение внутри зоны с точностью до нескольких метров, но не саму зону; самолёт чередует две сетки зон, чётную и нечётную, и приёмник, имеющий по одному сообщению каждого вида, может однозначно определить зону, а затем следить по одиночным сообщениям. Это изящный пример того, как получить больше точности из тех же бит, используя время.

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)

Дайте классу настоящее сообщение и позвольте его препарировать. Шестнадцатеричная строка 8D4840D6202CC371C32CE0576098 - это 28 шестнадцатеричных цифр, 112 бит. Перевод первых двух цифр, 8D, в двоичную систему даёт 10001 101: DF = 17, CA = 5. Следующие шесть цифр, 4840D6, - адрес ICAO, который таблицы распределения относят к Нидерландам. Следующие цифры, 20 ..., начинаются с 00100, код типа 4, сообщение опознавания, и декодирование следующих за ним 6-битных символов даёт позывной KLM1023. Последние шесть цифр, 576098, - контрольная сумма. Класс с электронной таблицей или несколькими строками на Python может выполнить всё декодирование за один урок, и умение взять строку шестнадцатеричных цифр и сказать «это самолёт KLM, объявляющий номер своего рейса» - тот результат, к которому стоит стремиться.

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: формат нисходящего канала 17, возможности 5. 4840D6: адрес ICAO, выделенный Нидерландам. 20...: код типа 4, опознавание, позывной KLM1023. 576098: 24-битная контрольная сумма.

Закончите контрольной суммой, потому что это та идея информатики, которую стоит развить больше всего. Над оживлённым аэропортом сообщения разных самолётов постоянно накладываются друг на друга в приёмнике, а импульсы ещё и теряются из-за шума; декодер

неизбежно будет собирать неверные биты. 24-битное поле в конце - циклический избыточный код: 88 бит сообщения рассматриваются как длинное двоичное число и делятся, в особой арифметике, где вычитание - это исключающее ИЛИ, на фиксированный 25-битный порождающий многочлен; остаток и есть CRC. Приёмник повторяет деление над декодированными битами и сравнивает. Любой один искажённый бит, любые два и любой пакет ошибок длиной до 24 бит меняют остаток, так что искажённое сообщение отбрасывается. Продемонстрируйте идею в малом масштабе 4-битным CRC над 8-битным сообщением, посчитанным вручную, или более простым аналогом - контрольной цифрой штрихкода; потом дайте старшей группе реализовать настоящий CRC-24 в нескольких строках кода и убедиться, что контрольная сумма сообщения из примера сходится, а переворот одного бита делает её неверной. Это обнаружение ошибок так, как его делает каждая современная система, встреченное в контексте, где пропущенная ошибка могла бы поставить призрачный самолёт на экран диспетчера.

Разобранный пример для задания

Сколько длится полная передача, и если транспондер посылает 4,5 расширенных сквиттера в секунду, какую долю времени он передаёт ADS-B? (120 микросекунд; 540 микросекунд в секунду, 0,054 процента.) Сколько самолётов в принципе могли бы делить канал, прежде чем он стал бы занят непрерывно, если не учитывать всё остальное, что на нём передаётся? (Около 1 850 - вот почему перегрузка над самым загруженным воздушным пространством - реальная инженерная проблема.)

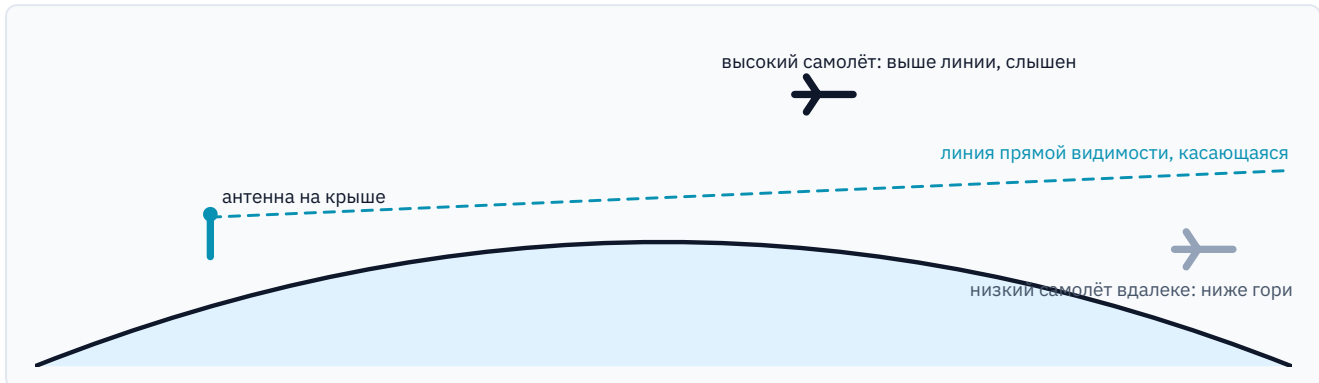
УРОК 4 - ФИЗИКА

Распространение и дальность: кривизна Земли и закон обратных квадратов

Как далеко приёмник может услышать самолёт? У вопроса два независимых ответа, геометрический и энергетический, и цель урока - вывести оба и обнаружить, что проектировщики позаботились об их согласии. Сначала геометрия. На 1090 МГц радиоволна не огибает Землю за счёт дифракции сколько-нибудь заметно; она ведёт себя как свет и движется по прямой. Поэтому приёмник слышит только самолёты выше своего горизонта, то есть те, от которых прямая к антенне не проходит сквозь землю. Выведите расстояние до горизонта вместе с классом. Антенна на высоте h над сферой радиуса R видит горизонт там, где её линия визирования касается сферы. Касательная, радиус к точке касания и радиус к антенне образуют прямой угол в точке касания, так что по Пифагору $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, откуда $d^2 = 2Rh + h^2$. Поскольку h ничтожно мало рядом с R , $d = \sqrt{2Rh}$. При $R = 6\,371$ км и h в метрах d в километрах $= \sqrt{2 \times 6371 \times h / 1000} = 3,57 \sqrt{h}$. Плотность атмосферы, а с ней и показатель преломления, падает с высотой, что слегка отклоняет радиолучи вниз; 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: $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451 \text{ км}$. Та же антенна, самолёт на 1 000 м: $4,12 \times (4,47 + 31,6) = 149 \text{ км}$. Самолёт на полосе в 30 км: $4,12 \times (4,47 + 2) = 27 \text{ км}$, значит, не слышен.



Пусть класс построит график d от h_2 для высоты антенны своей школы; кривая, сначала крутая, а потом выполаживающаяся, объясняет форму покрытия любого приёмника: круг в 400 км и более для крейсерского трафика, несколько десятков километров для самолётов на заходе и ничего на земле, кроме аэропорта по соседству. Она же объясняет, почему высота важнее любого другого свойства приёмника и почему холм между вами и аэропортом или собственное крыло самолёта, когда он кренится от вас, мгновенно обрывают трек. Демонстрация на площадке из курса начальной школы - видеть дальше со скамейки, чем сидя на корточках, - не ниже достоинства этого возраста, если за ней следует вывод; суть в том, что теперь они знают почему.

Теперь энергия. Транспондер излучает пиковую мощность в несколько сотен ватт, примерно равномерно во всех горизонтальных направлениях. На расстоянии d эта мощность распределилась по сфере площадью $4\pi d^2$, поэтому мощность, перехватываемая антенной с фиксированной эффективной площадью, падает как $1/d^2$: закон обратных квадратов, который класс должен вывести из площади сферы, а не заучить. Вдвое дальше - четверть мощности; в десять раз - сотая часть. Радиоинженеры выражают потери между изотропным передатчиком и изотропным приёмником в децибелах, и стандартная формула, которую старшая группа может принять на веру или вывести из эффективной площади антенны $\lambda^2 / 4\pi$, такова:

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

На 400 км и 1090 МГц: $20 \times 2,60 + 20 \times 3,04 + 32,44 = 52,0 + 60,7 + 32,4 = 145 \text{ дБ}$. Передатчик 250 Вт - это +54 дБм; принятая мощность равна $54 - 145 = -91 \text{ дБм}$, около $8 \times 10^{-13} \text{ Вт}$, то есть миллионная доля миллионной доли ватта.

Потратьте несколько минут на децибелы, если класс с ними не встречался, потому что они превращают умножение через четырнадцать порядков в сложение и потому что само число поучительно: приёмник на крыше обнаруживает сигнал в $10^{14,5}$ раз слабее того, что покинул самолёт. Хороший любительский приёмник может декодировать примерно до -100 дБм, так что на 400 км в запасе около 9 дБ, то есть энергетический предел и геометрический горизонт для авиалайнера на крейсерском режиме попадают в одно и то же место. Это не случайность;

мощность транспондера и требования к приёмникам были заданы так, чтобы самолёт был слышен до горизонта и не намного дальше, что уберегает канал от затопления передачами из соседней страны.

Два уточнения для старшей группы. Во-первых, Доплер: самолёт, приближающийся со скоростью 250 м/с, сдвигает принимаемую частоту на $f \times v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Гц, меньше одной миллионной несущей, чего приёмник никогда не замечает; сравните это со слышимым доплеровским сдвигом звука самолёта, где v / c равно $250 / 343$ и высота тона при пролёте меняется почти на октаву. Во-вторых, время распространения сигнала: 400 км со скоростью c - это 1,33 мс, так что положение в сообщении уже устарело на 1,33 мс, за которые самолёт сместился на 33 см; пренебрежимо для карты, решающе для мультилатерации из урока 2, которая живёт именно на этих микросекундах.

Разобраный пример для задания

Приёмник на 10-метровой мачте слышит самолёт на крейсерской высоте 11 000 м, но не слышит лёгкий самолёт на 600 м в 130 км. Лёгкий самолёт ниже горизонта? (Горизонт: $4,12 \times (3,16 + 24,5) = 114$ км, значит, да.) Как высоко должен быть приёмник, чтобы его услышать? (Нужно $4,12 \times (\sqrt{h_1} + 24,5) = 130$, откуда $\sqrt{h_1} = 7,05$, $h_1 = 50$ м.)

УРОК 5 - ФИЗИКА И ИНЖЕНЕРИЯ

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

Антенна - это проводник, в котором проходящая электромагнитная волна наводит переменный ток; приёмная и передающая антенны - одно и то же устройство, работающее в противоположных направлениях, и об этой взаимности классу стоит сказать явно. Наведённый ток наибольший, когда проводник резонирует: когда его длина такова, что распределение тока вдоль него совпадает с колебаниями волны, - в точности как струна нужной длины резонирует с определённой нотой, а качели - с определённым ритмом толчков. Основной резонанс прямого проводника - на половине длины волны, 13,75 см на 1090 МГц, с наибольшим током посередине и нулевым на концах. Практическая антенна ADS-B, на самолёте и на большинстве приёмников, - четвертьволновой штырь: вертикальный элемент длиной 6,9 см, стоящий на проводящем противовесе, который электрически 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 в столбик, чтобы сосредоточить чувствительность у горизонта. Модель, собранная в классе из стержня 6,9 см на крышке от консервной банки, показывает геометрию и длину, измеренную линейкой относительно волны 27,5 см; приёмник проекта, однако, использует антенну, настроенную на заводе, потому что несколько миллиметров ошибки расстраивают самодельную, и она слышит лишь малую долю неба.

Разверните диаграмму направленности, потому что она предсказывает то, что класс может наблюдать. Вертикальный штырь излучает и принимает сильнее всего в сторону горизонта и совсем не принимает вдоль собственной оси; его чувствительность, построенная в трёх измерениях, - бублик, сквозь дырку которого проходит антенна. Поэтому приёмник обычно

прекрасно слышит самолёты в 300 км и на несколько секунд теряет тот, что проходит прямо над головой, и класс может увидеть это на собственном приёмнике. Коллинеарная антенна - несколько резонансных элементов, поставленных друг на друга, - сплющивает бублик, повышая чувствительность у горизонта, где находятся далёкие самолёты, ценой дыры над головой: это усиление антенны, выражаемое в дБи, и оно получается перераспределением чувствительности, а не её созданием. Поляризация из урока 1 теперь имеет практическое следствие, которое проверит проект: антенна должна быть вертикальной.

Между антенной и компьютером - три ступени, каждая из которых - маленький урок. Полосовой фильтр пропускает 1090 МГц и отбрасывает несравненно более сильные передачи мобильных телефонов в нескольких сотнях мегагерц, которые иначе насытили бы усилитель. Малошумящий усилитель, установленный у антенны, а не у приёмника, умножает сигнал в тысячу раз, прежде чем тот войдёт в кабель; порядок важен, потому что коаксиальный кабель на 1090 МГц теряет примерно половину сигнала, 3 дБ, на каждых десяти метрах, а усиление после потерь усилило бы шум кабеля вместе с сигналом. Затем программно определяемое радио: USB-устройство за 20 евро, изначально сделанное как телевизионный тюнер, которое переносит сигнал на нулевую частоту и отбирает его значения два миллиона раз в секунду в поток чисел. С этого момента радиотехническая задача - задача программирования. Свободная программа просматривает поток отсчётов в поисках узора 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 опознавание по адресу ICAO и хранит состояние каждого самолёта, пока сообщения не перестанут приходить.

Дайте классу эту цепочку как схему, которую они нарисуют сами, с величиной на каждой ступени: нановольты переменного тока на антенне; микровольты после усилителя; два миллиона 8-битных чисел в секунду на выходе SDR; 112-битные кадры на выходе декодера, возможно, несколько сотен в секунду; одна запись на самолёт на выходе трекера. Главное, что нужно закрепить: точка на карте - дальний конец цепочки, в которой каждое звено - идея, которую они теперь понимают: резонанс, фильтрация, усиление, дискретизация, поиск узора, декодирование, проверка ошибок, агрегация.

Разобраный пример для задания

Кабель теряет 3 дБ на 10 м на 1090 МГц. Какую долю сигнала теряет, следовательно, отрезок в 20 м? (6 дБ, три четверти.) Если предел приёмника -100 дБм, а сигнал на антенне от самолёта в 400 км составляет -91 дБм, переживёт ли сигнал кабель без усилителя? (Едва-едва: -97 дБм. Любые дополнительные потери, дождь на разъёмах или более длинный отрезок - и самолёт у горизонта исчезает. Вот почему усилитель ставят у антенны.)

ПРОЕКТ - ОТ ДВУХ ДО ЧЕТЫРЁХ НЕДЕЛЬ

Соберите приёмник и проверьте физику по небу

Проект превращает пять уроков в измерения. Оборудование - USB-донгл программно определяемого радио (около 25 евро), настроенная на заводе антенна на 1090 МГц (50-70 евро), несколько метров коаксиального кабеля и ноутбук или Raspberry Pi с одним из свободных

декодеров (стандарт - dump1090 и его потомки). Установка занимает полдня, и через несколько минут программа показывает таблицу самолётов с их адресами ICAO, позывными, положениями, высотами и скоростями, а также карту. Всё в проекте работает только на приём; ничто не передаёт, и класс должен понимать, что передача на авиационных частотах была бы и незаконной, и опасной. Доступ на крышу требует обычного разрешения школы; окно на верхнем этаже, выходящее на основные потоки трафика, - вполне хорошее начало. Страница «Стать фидером» на этом сайте шаг за шагом проводит через ту же установку и позволяет приёмнику школы передавать данные на карту в реальном времени.

Первое исследование - радиогоризонт. Декодер сообщает для каждого самолёта расстояние и высоту, на которых его слышали в последний раз. За день соберите максимальную дальность, на которой принимались самолёты в нескольких диапазонах высот, и постройте график дальности от высоты. У учеников есть формула из урока 4 и высота антенны; они должны предсказать кривую, прежде чем увидят данные, а потом сравнить. Согласие обычно хорошее для высоких самолётов и хуже для низких, и обсуждение причин (здания, рельеф, дыра над головой у антенны, затенение самим самолётом) - то столкновение теории с измерением, которого учебник предложить не может. Карта самых дальних самолётов, услышанных в каждом направлении, которую рисует программа, показывает рельеф всего региона как тени в покрытии.

Второе - антенна. Сравните частоту сообщений и максимальную дальность с антенной в помещении, у окна и на крыше; вертикальной и положенной горизонтально; стоящей на металлической поверхности и удалённой от всякого металла. Каждое сравнение проверяет конкретное утверждение из уроков 1 и 5, и каждый результат следует сначала предсказать. Проверка поляризации - самая эффектная: положенная плашмя, антенна теряет большинство своих самолётов.

Третье - данные. Запишите полный день трафика и задайте ему вопросы: самый загруженный час, распределение крейсерских высот (ученики ожидают разброса, а находят большинство авиалайнеров между 10 000 и 12 000 м), скороподъёмность вылетающих из ближайшего аэропорта, государства, чьи самолёты пролетают чаще всего (по распределению адресов ICAO). Старшая группа может сама декодировать сырые сообщения из шестнадцатеричных строк, которые записывает программа, и проверить CRC в собственном коде. Класс со вторым приёмником в школе-партнёре в 30 и более километрах, оба с выходом, отмеченным временем GNSS, может попробовать двумерную мультилатерацию самолёта, который слышат оба, и сравнить её с положением, которое передал самолёт: самый амбициозный результат курса, и настоящий.

Закончите вопросами, которые система ставит и на которые не отвечает. Сообщения не подписаны, так что передатчик мог бы передать призрачный самолёт; что защищает систему и во что обошлась бы подписанная версия? Самолёт зависит от спутников, которые можно заглушить; что происходит с картиной диспетчера, когда это случается? Данные идентифицируют самолёт, а самолёт может идентифицировать человека; кто должен иметь право следить за кем? Класс, собравший приёмник, заслужил эти вопросы, и из них получается хорошее итоговое эссе или дискуссия.

Ответы на задачи для ученика

Страница для ученика ставит восемь задач, по одной-две на урок, которые можно использовать как домашнее задание или как итоговую проверку. Ответы с рассуждениями, которые должен содержать ответ на полный балл:

1. Длина волны на 1090 МГц: $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ м.
Четвертьволновой элемент: 6,9 см. Рассуждение: $c = f \times \lambda$, где постоянная скорость света навязывает обратную зависимость.
2. Свет быстрее звука в $3,00 \times 10^8 / 343$, то есть примерно в 875 000 раз. На 30 км сообщение идёт 100 микросекунд, а звук 87 с; самолёт на 250 м/с за это время пролетает 22 км.
3. Ошибка часов в 2 микросекунды даёт ошибку дальности $2 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 = 600$ м. Четыре спутника нужны потому, что сдвиг часов приёмника - четвёртая неизвестная наряду с x, y и z.
4. $2^{24} = 16\,777\,216$ адресов. 112-битное сообщение при 1 бите в микросекунду длится 112 микросекунд, 120 с преамбулой.
5. В 8D4840D6... 8D - это 10001101: первые пять бит 10001 - это 17, значит, DF = 17, сообщение ADS-B от транспондера Mode S; следующие три, 101, дают CA = 5. 4840D6 - адрес ICAO.
6. Радиогоризонт от антенны на 15 м до самолёта на 9 000 м: $4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407$ км. Для самолёта на 300 м: $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87$ км.
7. Удвоение расстояния уменьшает принятую мощность вчетверо, потому что та же переданная мощность распределяется по сфере вчетверо большей площади. Потери на трассе на 200 км и 1090 МГц: $20 \times 2,30 + 60,7 + 32,4 = 139$ дБ, на 6 дБ меньше, чем на 400 км, что согласуется с множителем четыре.
8. Антенна, положенная горизонтально, кросс-поляризована относительно вертикально поляризованной волны и принимает очень мало; наведённый ток зависит от составляющей электрического поля вдоль проводника. Приёмник на первом этаже теряет дальность, потому что его расстояние до горизонта, $4,12 \times \sqrt{h1}$, сокращается, и потому что здания заслоняют линию прямой видимости.

ДАЛЬШЕ

Проект, шаг за шагом

Проект урока 6 предполагал наличие приёмника; практикум его собирает. Он написан для того, кто никогда не пользовался Raspberry Pi: список покупок с ценами, какую антенну выбрать, её размещение и потери в кабеле, подготовка Pi, три команды, которые устанавливают фидер Dataero, привязка станции, настройка усиления и пять измерений, по одному на урок, которые проверяют физику по небу. Станция, которая кормит Dataero, даёт классу панель, карту покрытия и год истории для работы.

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