

БАЗОВЫЙ КУРС - ДЛЯ ЛЮБОГО ВЗРОСЛОГО

Что такое ADS-B и как это работает

Двенадцать глав. Никаких предварительных знаний об авиации или радио не требуется; для разобранных примеров достаточно школьной математики, а их можно и пропустить, не теряя нити. Время чтения - около 50 минут.

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

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1 Задача: небо полно самолётов, которых никто не видит

ГЛАВА 2 До ADS-B: поиск самолётов радаром

ГЛАВА 3 Идея: пусть самолёт скажет нам сам

ГЛАВА 4 Как самолёт знает, где он

ГЛАВА 5 Анатомия сообщения

ГЛАВА 6 - ФИЗИКА Волна: радио как невидимый свет

ГЛАВА 7 - ФИЗИКА Дальность: кривизна Земли и затухание сигнала

ГЛАВА 8 - ФИЗИКА Антенны: как поймать волну длиной 27 сантиметров

ГЛАВА 9 Приём и декодирование

ГЛАВА 10 От одного приёмника к карте континента

ГЛАВА 11 Для чего это используется и где не хватает

ГЛАВА 12 Краткая история

Глоссарий

ДАЛЬШЕ От теории к практике: соберите приёмник

ГЛАВА 1

Задача: небо полно самолётов, которых никто не видит

В обычный будний день воздушное пространство Европы пересекают около 30 000 рейсов. Авиалайнер на крейсерском режиме движется примерно со скоростью 250 метров в секунду, то есть 900 км/ч; два самолёта, летящие навстречу друг другу, сближаются на полкилометра каждую секунду. Пилот, глядя в окно, почти ничего из этого не видит: на высоте 10 000 метров другие самолёты - точки, да и облака скрывают большинство из них. Небо - это трёхмерная дорожная сеть, на которой не нарисовано дорог, а движение по ней и быстрое, и невидимое.

Служба управления воздушным движением существует для того, чтобы разводить это движение. Правила в принципе просты: в контролируемом воздушном пространстве самолёты держат на расстоянии не менее 1 000 футов (около 300 метров) по вертикали или на заданном расстоянии по горизонтали - обычно 5 морских миль (9,3 км) в зоне радиолокационного покрытия и гораздо больше над океанами. Чтобы применять эти правила, диспетчеру нужно непрерывно и надёжно знать положение каждого самолёта в своём секторе: не где он был минуту назад, а где он сейчас, на какой высоте и куда направляется. Весь этот курс - о том, как добывается это знание. Техническое слово для него - **наблюдение**.

Число, которое стоит запомнить

При 900 км/ч самолёт пролетает 15 км за минуту и 250 м за секунду. Любой метод наблюдения, который обновляется медленно или с большой ошибкой, оставляет диспетчера гадать ровно на тех расстояниях, которые имеют значение.

ГЛАВА 2**До ADS-B: поиск самолётов радаром**

Первым ответом, разработанным в конце 1930-х и доведённым до зрелости во время Второй мировой войны, стал **первичный радар**. Большая вращающаяся антенна посылает короткий, очень мощный импульс радиоэнергии. Когда импульс попадает в самолёт, крошечная его доля отражается обратно. Радар измеряет время между уходом импульса и возвращением эха; поскольку радиоволны движутся со скоростью света, 300 000 км/с, время даёт расстояние. Направление, в котором смотрела антенна, даёт пеленг. Первичный радар замечательно независим: самолёту не нужно вообще никакого оборудования, поэтому им до сих пор пользуются военные. Но у него есть серьёзные слабости. Эхо от далёкого самолёта чрезвычайно слабое, поэтому передатчик должен быть огромным. Эхо ничего не говорит о том, кто этот самолёт и на какой он высоте. А антенна делает полный оборот за несколько секунд, так что каждый самолёт виден лишь раз в 4-12 секунд, за которые он успевает сместиться на 3 км.

Второй ответ, **вторичный радар** (вторичный обзорный радиолокатор, SSR), превратил самолёт в участника. Наземная станция передаёт вопрос, *запрос*, на частоте 1030 МГц. Небольшая рация на борту, **транспондер** (ответчик), слышит вопрос и отвечает на частоте 1090 МГц собственным сильным сигналом. Поскольку ответ передаётся, а не отражается, он в миллионы раз сильнее радарного эха, а поскольку его формирует компьютер, он может нести информацию. В самой старой форме (Mode A) ответ содержит четырёхзначный код опознавания, назначенный диспетчером; в Mode C он содержит ещё и высоту самолёта. В 1980-х появился **Mode S** («S» - selective, избирательный), в котором у каждого транспондера есть уникальный 24-битный адрес, его можно запрашивать индивидуально, и он может отвечать сообщениями данных длиной 56 или 112 бит. Запомните это число, 1090 МГц, и эти слова, Mode S: ADS-B построен непосредственно на том и другом.

Вторичный радар стал большим шагом вперёд, но два ограничения он унаследовал от предшественника. Самолёт говорит только тогда, когда его спрашивают, поэтому на земле по-прежнему нужна запрашивающая станция в пределах досягаемости, а это исключает океаны, пустыни и горные хребты. И станции по-прежнему нужна вращающаяся антенна, чтобы понять, с какого направления пришёл ответ, поэтому каждый самолёт по-прежнему виден лишь раз за оборот, и на экране диспетчера по-прежнему точка, прыгающая каждые несколько секунд, а не плавно движущийся самолёт. Чтобы улучшить это, требовалось нечто принципиально иное: способ, которым самолёт сообщал бы своё положение, не дожидаясь вопроса, и при котором земле вообще не нужно было бы ничего измерять.

ГЛАВА 3

Идея: пусть самолёт скажет нам сам

К 1990-м годам созрели две технологии, сделавшие возможным другой подход. Спутниковая навигация давала каждому должным образом оснащённому самолёту точное знание собственного положения, намного лучшее, чем мог измерить с земли любой радар. А транспондер Mode S уже был радиостанцией, способной передавать сообщения данных на 1090 МГц. Сложите их вместе, и логика становится неотразимой: вместо того чтобы земля с трудом измеряла, где находится самолёт, пусть самолёт, который и так это знает, просто сообщает об этом, через равные промежутки, всем. Это и есть ADS-B (в русскоязычной литературе - АЗН-В), и четыре слова его названия - точное описание.

Оно **автоматическое** (automatic): ничто не запускает передачу. Транспондер передаёт по собственному расписанию, примерно дважды в секунду, независимо от того, есть ли в пределах досягаемости наземная станция и делает ли что-нибудь пилот; более того, пилот не может остановить его в полёте иначе, чем выключив транспондер, что запрещено. Оно **зависимое** (dependent): каждый элемент сообщения берётся из собственного оборудования самолёта - положение из его спутникового приёмника, высота из его барометрического высотомера, - а земля ничего не измеряет; она верит тому, что ей говорят. Это **наблюдение** (surveillance): его цель - дать другим знать, где находится самолёт, для управления воздушным движением и для соседних самолётов, в отличие от навигации, когда самолёт сам знает, где он, и от связи, то есть разговора с пилотом. И это **радиовещание** (broadcast): у сообщения нет адресата, нет подтверждения приёма и нет шифрования, и каждый, у кого есть приёмник в пределах досягаемости, слышит в точности одно и то же, будь то центр управления, другой авиалайнер или школа.

«Зависимое» - то слово, которое тревожит инженеров и которое больше всего заслуживает объяснения. Радар делает независимое измерение: если приборы самолёта ошибаются, радару всё равно. ADS-B наследует каждую ошибку собственной навигационной системы самолёта, и если эта система обманута или отказала, переданное положение ошибочно с той же уверенностью. Вот почему каждое сообщение ADS-B несёт, рядом с положением, заявление о том, насколько самолёт доверяет своему собственному положению (категории целостности и точности, с которыми мы встретимся в главе 5), и вот почему радар не выключили.

«Радиовещание» - то слово, которое делает этот курс возможным. Поскольку сообщения передаются открыто и для всех, их слышит не только служба управления воздушным движением, но и любой приёмник, настроенный на 1090 МГц, включая тот, который вы можете поставить на крышу школы. То же свойство - источник главного ограничения системы, о котором говорится в главе 11: сообщение, которое может прочитать любой, - это и сообщение, которое любой может подделать.

ГЛАВА 4

Как самолёт знает, где он

Всё в ADS-B держится на том, что самолёт знает своё положение, поэтому эта глава - о спутниковой навигации. Общий термин - **GNSS**, глобальная навигационная спутниковая система; американская GPS известна лучше всех, а европейская Galileo, российская ГЛОНАСС и китайская BeiDou работают по тому же принципу. Каждая система - это созвездие из примерно 24-30 спутников, обращающихся на высоте около 20 000 км, намного выше самолётов, и каждый несёт атомные часы с точностью до нескольких миллиардных долей секунды. Каждый спутник непрерывно передаёт радиосигнал, который говорит, в сущности: «это спутник номер N, моё положение такое-то, и время, в которое я это послал, ровно T».

Приёмник на самолёте слышит этот сигнал чуть позже, потому что радиоволне нужно время на дорогу: при 300 000 км/с 20 000 км от спутника занимают около 67 тысячных долей секунды. Приёмник сравнивает время, проставленное в сообщении, со временем прихода. Разность, умноженная на скорость света, - это расстояние до данного спутника. Одно расстояние помещает приёмник где-то на сфере вокруг этого спутника. Две сферы пересекаются по окружности; три сферы - в двух точках, одна из которых обычно нелепа (глубоко под землёй или далеко в космосе) и отбрасывается. Так что трёх спутников хватило бы, будь у приёмника идеальные часы.

Их у него нет. Атомные часы стоят десятки тысяч евро и не поместились бы; у приёмника дешёвые кварцевые часы, которые могут ошибаться куда сильнее, чем допускает требуемая точность измерения времени. И вот изящная часть. Приёмник рассматривает ошибку собственных часов как четвертую неизвестную, рядом с тремя координатами положения, и слушает четвертый спутник. Четыре уравнения, четыре неизвестных: приёмник находит своё положение и, как побочный продукт, исправляет собственные часы с точностью до нескольких десятков наносекунд. Вот почему спутниковому приёмнику нужны как минимум четыре видимых спутника и почему каждый приёмник GNSS, между прочим, ещё и один из самых точных часов в здании.

На величинах стоит задержаться, потому что они объясняют, почему спутниковая навигация - это на самом деле упражнение в измерении времени, а геометрия здесь - дело второе. Свет проходит 30 сантиметров за наносекунду и 300 метров за микросекунду, поэтому ошибка времени в одну миллионную секунды становится ошибкой положения в 300 метров, а точность современного приёмника в несколько метров соответствует измерению времени на уровне примерно десяти наносекунд. Возьмём конкретный случай. Спутник помечает сигнал временем 12:00:00,000 000 000; приёмник самолёта слышит его в 12:00:00,070 000 000. Время в пути - 0,070 с, значит, расстояние равно $0,070 \times 300\,000 \text{ км/с} = 21\,000 \text{ км}$. Если бы собственные часы приёмника спешили всего на одну микросекунду, он вычислил бы 21 000,3 км, на 300 метров больше, и та же ошибка вкралась бы и в расстояние до каждого другого спутника. Именно эту общую ошибку четвертый спутник выявляет и устраняет.

Две высоты, а не одна

Спутники дают высоту над математической поверхностью Земли, *геометрическую* высоту. Однако высота, которую самолёт передаёт для целей управления воздушным движением, - не она. Это **барометрическая высота**, выведенная из давления воздуха снаружи самолёта, которое измеряется через небольшое отверстие в фюзеляже, называемое приёмником статического

давления. Давление воздуха падает с высотой известным образом (примерно 1 гПа на 8 метров у земли, медленнее выше), и каждый высотомер в мире переводит давление в высоту по одной и той же стандартной атмосфере, отсчитываемой от 1013,25 гПа на уровне моря. В день с необычным давлением барометрическая высота каждого самолёта ошибочна на одну и ту же величину, и в этом-то и суть: для эшелонирования важна не истинная высота над морем, а то, что два самолёта, у которых обоих на приборе «эшелон 350», действительно находятся в 300 метрах от того, у которого «эшелон 340». ADS-B передаёт в сообщениях о положении барометрическую высоту с шагом 25 футов (7,6 м) и отдельно передаёт разность между нею и спутниковой высотой, так что приёмник может восстановить обе.

ГЛАВА 5

Анатомия сообщения

Сообщение ADS-B, которым пользуются авиалайнеры по всему миру, - это передача Mode S, называемая **расширенным сквиттером** (extended squitter); «сквиттер» - старый радарный жаргон для передачи, посылаемой самопроизвольно, а не в ответ, а «расширенный» - потому что при длине 112 бит он вдвое длиннее исходного ответа Mode S. Инженеры пишут «1090ES» вместо «расширенный сквиттер на 1090 МГц». Каждая передача длится в общей сложности 120 микросекунд: 8-микросекундная *пreamбула*, фиксированный узор из четырёх импульсов, по которому приёмник распознаёт начало сообщения и синхронизирует свои часы, а за ней 112 бит данных со скоростью один бит в микросекунду.

Как передаётся бит: позиционно-импульсная модуляция

Каждый битовый интервал длительностью в одну микросекунду делится на две половины. Импульс радиоэнергии в первой половине и тишина во второй означают 1; тишина, а затем импульс означают 0. Таким образом, на каждый бит приходится ровно один импульс, какими бы ни были данные, и приёмнику нужно лишь решить, какая половина каждого интервала была громче. Эта схема, позиционно-импульсная модуляция, устойчива к тем видам шума и замираний, от которых сигнал страдает на пути от транспондера к далёкой антенне, и её дёшево декодировать.

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



112 бит

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)

Первые пять бит, формат нисходящего канала, говорят, что это за сообщение Mode S; значение 17 означает «ADS-B от транспондера Mode S». 24-битный **адрес ICAO** - постоянный идентификатор самолёта, присваиваемый при регистрации: существует 2^{24} , то есть 16 777 216, возможных адресов, которые ICAO, орган ООН по гражданской авиации, выделяет государствам блоками. Бельгийские самолёты, например, носят адреса от 448000 до 44FFFF в шестнадцатеричной записи. В отличие от четырёхзначного кода старого Mode A, этот адрес никогда не меняется и никогда не бывает общим, так что приёмник с самого первого сообщения точно знает, какой самолёт он слышит.

56-битное поле **ME** - это собственно содержание, и его первые пять бит, *код типа*, говорят, что означает остальное. Коды типов с 1 по 4 несут позывной самолёта, например BEL1234 или RYR7KL, в виде восьми шестибитных символов. Коды с 9 по 18 несут положение в воздухе с барометрической высотой; с 20 по 22 - то же самое со спутниковой высотой. Код 19 несёт скорость: путевую скорость, разложенную на составляющие восток-запад и север-юг, вертикальную скорость и разность между барометрической и спутниковой высотой. Коды 28, 29 и 31 несут статус: коды аварийной ситуации, заданную высоту и категории целостности и точности, которые говорят, насколько можно доверять переданному положению (например, «NIC», равный 8, обещает, что истинное положение с высокой вероятностью находится в пределах 185 м от сообщённого).

Последние 24 бита - **циклический избыточный код**, число, вычисленное из предыдущих 88 бит делением на фиксированный многочлен. Приёмник повторяет вычисление над декодированными битами; если результат не совпадает, по крайней мере один бит был повреждён в пути, и сообщение отбрасывается. Поскольку импульс длительностью в микросекунду легко потерять из-за шума или наложившегося сообщения другого самолёта, именно эта проверка не пускает искажённые положения на экран диспетчера. Настоящее сообщение, каким его записал бы приёмник, выглядит так:

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D: формат нисходящего канала 17, возможности 5. 4840D6: адрес ICAO, нидерландский самолёт. 20...: код типа 4, сообщение опознавания, которое декодируется в позывной KLM1023. 576098: проверка ошибок.

Как уместить Землю в 34 бита

В сообщении о положении есть лишь 17 бит на широту и 17 на долготу. Это 131 072 шага вокруг всего земного шара, около 300 м каждый на экваторе: далеко не достаточно. ADS-B решает это с помощью **компактного представления положения** (compact position reporting, CPR). Земля делится на зоны; 17 бит дают очень точное положение (примерно до 5 м) внутри зоны, но не саму зону. Самолёт чередует две слегка различающиеся сетки зон, «чётные» и «нечётные» сообщения, и приёмник, услышавший по одному сообщению каждого вида, может однозначно вычислить зону. Как только он это сделал, одного сообщения достаточно, чтобы следить за самолётом, ведь тот едва ли мог перескочить в другую зону за полсекунды. Это изящный трюк, удваивающий полезную точность без единого лишнего бита.

Как часто

Транспондер в полёте посылает сообщение о положении дважды в секунду, сообщение о скорости дважды в секунду и свой позывной каждые пять секунд, плюс сообщения о статусе через более длинные промежутки, итого около четырёх-пяти расширенных сквиттеров в секунду. Каждый длится 120 микросекунд; фактически транспондер передаёт ADS-B существенно меньше тысячной доли времени. Остаток секунды он слушает запросы радаров на 1030 МГц и запросы систем предотвращения столкновений других самолётов и отвечает на них.

ГЛАВА 6 - ФИЗИКА

Волна: радио как невидимый свет

Сообщение покидает самолёт в виде **радиоволны**, и самая полезная мысль во всём этом курсе состоит в том, что радиоволна и луч света - одно и то же. И то и другое - электромагнитные волны: узор из электрического и магнитного полей, колеблющихся вместе и несущихся сквозь пространство со скоростью света c , которая равна 299 792 458 метров в секунду, или, с достаточной точностью, 300 000 км/с. Радиоволну от зелёного света, от рентгеновских лучей в больнице или от микроволн в кухонной печи отличает только то, как быстро колеблются поля: **частота** f , измеряемая в герцах (колебаниях в секунду).

Поскольку волна движется с постоянной скоростью, частота задаёт расстояние от одного гребня до следующего, **длину волны** λ . За одну секунду волна проходит c метров и совершает f колебаний, так что на каждое колебание приходится c / f метров:

$$c = f \times \lambda$$

Для ADS-B: $\lambda = 300\,000\,000 / 1\,090\,000\,000 = 0,275$ м. У волны между самолётом и вашей антенной гребни расположены через 27,5 см - примерно длина школьной линейки.

Волна	Частота	Длина волны	Примечание
FM-радиовещание	100 МГц	3 м	Автомобильные антенны - лишь доля этого
ADS-B / Mode S	1 090 МГц	27,5 см	Та же частота у ответов радарных транспондеров
Мобильный телефон (диапазон 4G)	1 800 МГц	17 см	Близкий сосед по спектру
Wi-Fi, микроволновая печь	2 450 МГц	12 см	Та же частота, совершенно разная мощность
Видимый зелёный свет	560 000 000 МГц	0,000 54 мм	В полмиллиона раз выше по частоте

Два следствия важны для всего дальнейшего. Во-первых, раз волна - это свет, она движется по прямой, если что-то её не отклоняет или не заслоняет, и сквозь Землю она не проходит. Это задаёт дальность системы, предмет главы 7. Во-вторых, раз её длина волны 27,5 см, металлические конструкции, которые взаимодействуют с ней сильнее всего, то есть антенны, имеют размер того же порядка - предмет главы 8.

Почему радио - это не звук

Самая частая путаница, у взрослых не меньше, чем у детей, - между радио и звуком, вероятно, потому что «радио» - это коробка, из которой идёт звук. Это никак не связанные явления. Звук - волна давления в воздухе, цепочка молекул, толкающих соседей; ему нужно вещество, по которому распространяться, он движется со скоростью 340 м/с и не может пересечь вакуум. Радиоволне не нужно ничего: она пересекает вакуум между спутником и самолётом и движется почти в миллион раз быстрее. Шум двигателей самолёта и его сообщение ADS-B покидают его в один и тот же миг; сообщение приходит на приёмник в 20 км за 67 микросекунд, звук - через целую минуту.

Почему 1090 МГц

Частота - это наследство. Международные соглашения 1950-х годов зарезервировали полосу от 960 до 1215 МГц для авиационной радионавигации, и 1090 МГц стала частотой ответа транспондеров вторичного радар. Когда проектировали ADS-B, использовать транспондер, уже стоящий на каждом авиалайнере, было куда дешевле, чем ставить новую радиостанцию, так что ADS-B просто стал ещё одной вещью, которую транспондер Mode S говорит на 1090 МГц. В Соединённых Штатах небольшие самолёты, летающие ниже примерно 5 500 м, могут вместо этого использовать вторую систему, UAT на 978 МГц, поэтому тамошние приёмники часто слушают обе.

ГЛАВА 7 - ФИЗИКА

Дальность: кривизна Земли и затухание сигнала

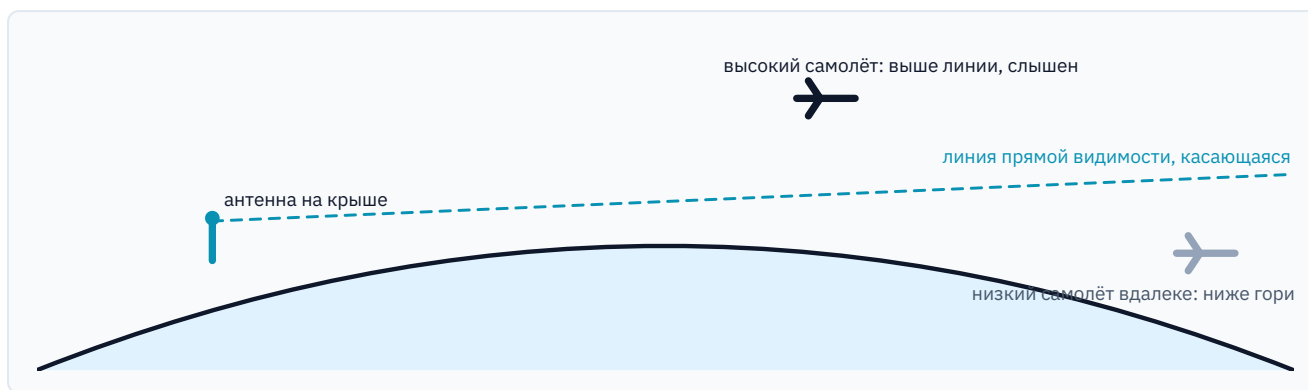
Транспондер передаёт с пиковой мощностью в несколько сотен ватт. Как далеко можно услышать такой сигнал? Его ограничивают две совершенно разные вещи, и их стоит различать: геометрия, которая задаёт жёсткую границу, и мощность, которая задаёт мягкую.

Радиогоризонт

На 1090 МГц радиоволна ведёт себя как свет: движется по прямой и не огибает Землю. Поэтому наземная антенна слышит самолёт лишь до тех пор, пока между ними есть прямая, не проходящая сквозь землю. Для наблюдателя на поверхности горизонт - там, где эта прямая едва касается Земли. Чем выше самолёт, тем дальше точка касания; чем выше антенна, тем дальше ещё. Геометрия касательной к сфере даёт простой результат: расстояние до горизонта в километрах - это примерно 3,57, умноженное на квадратный корень из высоты в метрах. Атмосфера слегка отклоняет радиоволны вниз, что растягивает горизонт примерно на 15 процентов, поэтому инженеры берут 4,12 вместо 3,57:

$$d \text{ (км)} = 4.12 \times (\sqrt{h \text{ самолёта}} + \sqrt{h \text{ антенны}}) \quad \text{высоты в метрах}$$

Самолёт на 11 000 м, антенна на крыше высотой 20 м: $4,12 \times (104,9 + 4,5) = 451$ км. Самолёт на 1 000 м, та же крыша: $4,12 \times (31,6 + 4,5) = 149$ км. Самолёт на земле в 15 км: не слышен вовсе, если только местность между ними не ровная и открытая.



Это объясняет характерную форму зоны покрытия приёмника: круг в 400 км и более для высоко летящего трафика, сжимающийся до нескольких десятков километров для самолётов на заходе и почти до нуля для самолётов на земле, если только аэропорт не по соседству. Это также объясняет, почему высота установки приёмника значит гораздо больше, чем его качество, и почему холм, высокое здание или даже собственное крыло самолёта, когда он кренится от вас, могут мгновенно оборвать сигнал.

Закон обратных квадратов

В пределах горизонта сигнал слабеет с расстоянием. Антенна транспондера излучает во все горизонтальные направления, так что её мощность расходится по всё большей сфере. Площадь сферы растёт как квадрат радиуса, поэтому мощность, приходящаяся на антенну фиксированного размера, падает как квадрат расстояния: вдвое дальше - четверть мощности; в десять раз дальше - сотая часть. Инженеры выражают это как *потери на трассе* в децибелах, и для 1090 МГц на 400 км они составляют около 145 дБ, то есть принятая мощность примерно в $10^{14,5}$ раз меньше переданной. Импульс в 250 ватт приходит как примерно десятая доля миллиардной доли милливатта. Хороший приёмник способен это обнаружить - едва-едва, и именно поэтому геометрический горизонт и предел по мощности совпадают на нескольких сотнях километров: система так и была спроектирована.

Два предела взаимодействуют так, что это стоит понять. В пределах горизонта и сильный сигнал от близкого самолёта, и слабый от далёкого декодируются безупречно, потому что позиционно-импульсная схема из главы 5 спрашивает лишь, какая половина каждого битового интервала была громче, а не насколько громче. Сигнал не теряет полезность постепенно по мере удаления самолёта; он остаётся декодируемым, пока где-то у горизонта либо геометрия его не обрежет, либо шум в приёмнике наконец его не утопит, - и трек обрывается. Вот почему у карт покрытия резкие края и почему самые дальние самолёты, которые слышит приёмник, почти всегда самые высокие.

ГЛАВА 8 - ФИЗИКА

Антенны: как поймать волну длиной 27 сантиметров

Антенна - это кусок проводника такой формы, что проходящая электромагнитная волна приводит электроны в нём в согласованное движение, порождая крошечный переменный ток, который приёмник может усилить. В передатчике происходит обратное: переменный ток в антенне самолёта запускает волну. Эффективность этого обмена зависит от размера проводника

относительно длины волны. Прямой провод отзывается сильнее всего, *резонирует*, когда его длина равна половине длины волны, так что ток, качающийся вдоль него туда-сюда, в точности попадает в такт колебаниям волны, как детские качели, которые толкают в их собственном ритме. Для 1090 МГц половина длины волны - 13,75 см.

Самая распространённая практическая форма - **четвертьволновой штырь** (монополь): вертикальный стержень длиной в четверть волны, 6,9 см, стоящий на проводящей поверхности, *противовесе*. Противовес действует как зеркало, так что стержень вместе со своим отражением ведёт себя как полуволновая антенна. Вот почему антенна ADS-B на самолёте - коротенький штырёк высотой в несколько сантиметров на фюзеляже, где фюзеляж служит противовесом, и почему антенна любителя - короткий провод на крышке от консервной банки. Провод неправильной длины тоже работает, но гораздо хуже: «металлическое ухо» настроено.

Ещё три свойства антенны вытекают из физики, и у каждого есть видимое следствие. Первое - **поляризация**. Электрическое поле электромагнитной волны колеблется в определённом направлении под прямым углом к направлению её движения, а антенна отзывается только на ту составляющую поля, которая направлена вдоль её собственной длины. Антенны на самолётах установлены вертикально, поэтому волна ADS-B приходит с вертикальной поляризацией, и приёмная антенна тоже должна быть вертикальной; положенная на бок, она почти ничего не слышит, как волну на верёвке, которую трясут вверх-вниз, останавливает горизонтальная щель. Второе - **диаграмма направленности**. Вертикальная антенна наиболее чувствительна в сторону горизонта и совсем не чувствительна вдоль собственной оси, так что её чувствительность в трёх измерениях имеет форму бублика, сквозь дырку которого проходит антенна. Поэтому приёмники без труда слышат самолёты в 300 км и на несколько секунд теряют тот, что проходит прямо над головой, - за этим стоит понаблюдать на любой карте в реальном времени. Если поставить несколько резонансных элементов один над другим, бублик сплющивается, и чувствительность сосредоточивается у горизонта, где находятся далёкие самолёты, за счёт зенита; это и называют **усилением** антенны, и это всегда перераспределение чувствительности, а не её создание.

Третье касается того, что стоит между антенной и приёмником. Антенна ловит не только 1090 МГц, но и все сигналы в округе, включая передачи мобильных телефонов в нескольких сотнях мегагерц от неё, которые несравненно сильнее, поэтому первым ставят фильтр, пропускающий только авиационный диапазон. Затем сигналу нужно пройти по кабелю, а на 1090 МГц коаксиальный кабель теряет примерно половину сигнала на каждых десяти метрах; средство - маломощный усилитель у антенны, перед кабелем, чтобы сигнал был достаточно сильным и пережил дорогу, а не у приёмника, где усиление усилило бы шум кабеля вместе с тем, что осталось от сигнала. Это детали, но именно эти детали решают, услышит ли приёмник на крыше школы самолёты у горизонта или только те, что поблизости.

ГЛАВА 9

Приём и декодирование

Между антенной и точкой на карте - цепочка из пяти ступеней. Антенна превращает проходящую волну в переменный ток в несколько микровольт. Фильтр и маломощный усилитель оставляют полосу 1090 МГц, отбрасывают всё остальное и усиливают сигнал в тысячу раз. Программно определяемое радио настраивается на частоту и отбирает значения сигнала два миллиона раз в

секунду, превращая его в поток чисел. Декодер ищет в этом потоке узор преамбулы, считывает 112 бит, проверяет контрольную сумму и декодирует поля. А трекер собирает сообщения от каждого самолёта в одну непрерывно обновляемую запись: положение, трек, подпись.

Замечательна третья ступень. Примерно до 2010 года для декодирования 1090 МГц требовалось специализированное оборудование стоимостью в тысячи евро. Потом любители обнаружили, что в USB-тюнере для телевидения за 20 евро стоит микросхема, которой можно приказать настроиться на любую частоту и отдать сырой сигнал компьютеру. Это **программно определяемое радио** (SDR) превращает радиотехническую задачу в задачу программирования: ноутбук или Raspberry Pi получает поток из двух миллионов чисел в секунду, описывающих силу сигнала, а свободная программа ищет узор преамбулы, измеряет, какая половина каждого микросекундного интервала громче, собирает 112 бит, вычисляет CRC и печатает поля. Проект приёмника в наборе для средней школы - в точности эта цепочка, и школа может собрать её дешевле чем за 100 евро.

Ступень трекера - там, где поток сообщений становится знанием. Одно сообщение о положении, напомним, неоднозначно, пока не найдена пара из чётного и нечётного сообщений. Скорость приходит отдельно от положения, позывной - ещё отдельно, и трекер сшивает их вместе по адресу ICAO, отбрасывает всё, что не прошло проверку ошибок, и хранит последнее известное состояние каждого самолёта. Если сообщений нет в течение минуты, обычно потому, что самолёт ушёл за горизонт, трек истекает.

ГЛАВА 10

От одного приёмника к карте континента

Один приёмник слышит круг неба диаметром в несколько сотен километров. Карте Европы нужны сотни таких, и полезны не те, что в городах, а разбросанные: на побережьях, в долинах, на островах - везде, куда не дотягивается круг другого приёмника. Каждый приёмник отправляет свои декодированные сообщения, каждое с отметкой времени прихода, через интернет в центральный сервис. Этот сервис *агрегирует*: одно и то же сообщение от высоко летящего самолёта обычно приходит сразу от десяти-двадцати приёмников, и дубликаты нужно распознать и объединить. Он также проверяет: положение, расходящееся с тем, как тот же самолёт видят все соседние приёмники, - скорее всего, ошибка декодирования или неисправный транспондер, и его помечают или отбрасывают.

Мультилатерация: как найти самолёты, которые не говорят, где они

Не каждый самолёт передаёт положение. Старые транспондеры отвечают радару кодом и высотой, но не имеют спутникового входа; некоторые самолёты намеренно его не передают. Тем не менее их передачи на 1090 МГц всё равно доходят до земли, и сеть может определить их положение, вывернув спутниковую навигацию наизнанку. Если четыре приёмника с точно синхронизированными часами каждый фиксируют момент прихода одной и той же передачи, разности между этими моментами выдают разности расстояний: сообщение, которое дошло 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. Все точки с этим свойством лежат на изогнутой поверхности, гиперboloиде, между А и В. Три такие поверхности, от четырёх приёмников, пересекаются в

самолёте. Это **мультилатерация**, и она требует согласованности времени примерно до десятой доли микросекунды, 30 м, между приёмниками, разнесёнными на сотни километров, - и приёмники получают её от тех же спутников, которыми пользуется самолёт.

Одна и та же идея, дважды

Спутниковая навигация: один приёмник, четыре передатчика с известными положениями, найти приёмник. Мультилатерация: один передатчик, четыре приёмника с известными положениями, найти передатчик. И там и там на самом деле измеряется время, и 1 микросекунда - это 300 метров.

ГЛАВА 11

Для чего это используется и где не хватает

Первый потребитель - управление воздушным движением. По всей Европе диспетчеры теперь видят объединённую картину, в которой ADS-B, с его обновлениями дважды в секунду и точностью спутникового уровня, сочетается с радаром и мультилатерацией; там, куда радар никогда не дотягивался, - над Северной Атлантикой, Арктикой, Сахарой и большинством океанов, - сообщения ADS-B ловят приёмники на низкоорбитальных спутниках связи, что позволило располагать самолёты, пересекающие Атлантику, гораздо плотнее, чем раньше. Второй потребитель - сами самолёты: авиалайнер с «ADS-B In» показывает экипажу ближайший трафик и передаёт его в систему предотвращения столкновений. Аэропорты используют его, чтобы следить за самолётами и машинами на земле в тумане. Исследователи используют открытые данные для изучения шума, расхода топлива, инверсионных следов и задержек. А приёмник на крыше школы - в малой степени участник всего этого.

Слабости системы прямо вытекают из её устройства, и каждую стоит понять, а не просто перечислить. Поскольку сообщения передаются открыто, без шифрования и без подписи, в самом сообщении нет ничего, что доказывало бы, что оно пришло от самолёта. Передатчик на земле мог бы, незаконно, передать безупречно сформированное сообщение, описывающее несуществующий самолёт, и приёмник декодировал бы его без возражений. Систему защищает не сообщение, а контекст вокруг него: призрак не появится на радаре, не будет найден мультилатерацией и не будет вести себя как настоящий трафик, а центры управления непрерывно сверяют данные. Версия протокола с криптографическими подписями обсуждается уже много лет; препятствие не столько техническое, сколько практическое, ведь пришлось бы заменить каждый транспондер в мире.

Поскольку положение зависит от спутникового приёмника самолёта, всё, что мешает спутниковой навигации, мешает и ADS-B. Глушение и подмена спутниковых сигналов стали обычным делом вблизи зон конфликтов, и самолёт, пролетающий через такой район, может оказаться не в состоянии вычислить положение или вычислить неверное. Его сообщения тогда несут пониженную категорию целостности, система диспетчера их помечает, и в дело вступает радар - независимое измерение, которое ADS-B никогда не должен был полностью заменить. Отношения между ними, таким образом, - не преемника и предшественника, а партнёров с дополняющими друг друга слабостями.

Поскольку требование об оснащении распространяется на авиалайнеры и большинство крупных самолётов, но не на всё, что летает, карта неполна по замыслу. Лёгкие самолёты вне контролируемого воздушного пространства, планеры, воздушные шары и многие военные самолёты могут вовсе не иметь ADS-B, а некоторые лёгкие самолёты используют другие системы, которых приёмник на 1090 МГц не слышит. И поскольку передача идентифицирует самолёт, она может идентифицировать и его владельца: следить за конкретным частным самолётом - значит, по сути, следить за конкретным человеком, что привело к программам, скрывающим регистрацию самолётов по просьбе владельцев, и к продолжающемуся спору о том, может ли информация, которую самолёт передаёт всему миру, быть при этом частной. Этот спор хорошо предложить старшим ученикам, потому что физика ответа на него не даёт.

ГЛАВА 12

Краткая история

1935-1945

Первичный радар разрабатывается в Британии, Германии и Соединённых Штатах; к концу войны транспондеры «свой-чужой» отвечают на импульсы радара кодированным ответом - предок вторичного радара.

1950-е - 1960-е

Стандартизирован гражданский вторичный радар: запросы на 1030 МГц, ответы на 1090 МГц, коды опознавания Mode A и высота Mode C.

1980-е

Mode S, с уникальными 24-битными адресами и сообщениями данных, разработан в Линкольновской лаборатории MIT и принят ICAO. GPS становится доступной гражданским пользователям.

1990-е - 2000-е

ADS-B определён и опробован, прежде всего на Аляске, где радиолокационное покрытие было невозможно, а аварии часты. Расширенный сквиттер на 1090 МГц стандартизирован на международном уровне.

2010-е

Дешёвые программно определяемые радиоприёмники превращают приём в хобби; появляются волонтёрские сети из тысяч приёмников. Приёмники выводятся на спутники для покрытия океанов.

2020

ADS-B становится обязательным для большинства самолётов в контролируемом воздушном пространстве в Соединённых Штатах (январь) и в Европейском союзе (июнь, с переходным периодом до конца года). Небо начинает говорить - везде и всё время.

Глоссарий

ADS-B

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, автоматическое зависимое наблюдение - радиовещательное. Самолёты сами передают своё положение.

Барометрическая высота

Высота, выведенная из давления воздуха по стандартной атмосфере; её и сообщают самолёты.

CPR

Компактное представление положения (compact position reporting), схема «чётный/нечётный», укладывающая точное положение в 34 бита.

CRC

Циклический избыточный код, 24-битная проверка ошибок в конце каждого сообщения.

Расширенный сквиттер

Самопроизвольная 112-битная передача Mode S, которая несёт ADS-B.

GNSS

Глобальная навигационная спутниковая система: GPS, Galileo, ГЛОНАСС, BeiDou.

Адрес ICAO

Постоянный 24-битный идентификатор транспондера самолёта.

Mode S

Избирательный стандарт вторичного радара, на котором построен ADS-B.

Мультилатерация

Определение положения передатчика по разностям времени прихода сигнала на несколько приёмников.

Потери на трассе

Ослабление сигнала с расстоянием по закону обратных квадратов.

Радиогоризонт

Наибольшее расстояние, на котором прямая между антенной и самолётом ещё не задевает Землю.

SDR

Программно определяемое радио: тюнер, который отдаёт сырые отсчёты сигнала компьютеру для декодирования.

SSR

Вторичный обзорный радиолокатор: земля запрашивает, транспондер отвечает.

Транспондер

Бортовая радиостанция, которая отвечает радару и передаёт ADS-B на 1090 МГц.

Длина волны

Расстояние между соседними гребнями волны: c / f , 27,5 см на 1090 МГц.

ДАЛЬШЕ

От теории к практике: соберите приёмник

Двенадцать глав объяснили систему, которую теперь можно взять в руки. Практикум превращает их в работу на один вечер: что купить за 100-150 евро, как собрать и разместить антенну, как подготовить Raspberry Pi и установить фидер Dataero и как увидеть, что самолёты, которые вы слышите, появляются на живой карте с указанием вашей станции. Каждую главу выше там ждёт своё измерение: радиогоризонт по настоящим самолётам, закон обратных квадратов в столбце сигнала, суточный ритм неба.

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