

12 到 18 岁 - 给教师

解码天空：通过一个真实系统学物理与计算机

五节课加一个项目。每节课取 ADS-B 的一个部分，完整展开其背后的物理或计算机原理：班级能跟上的推导、用真实数字做的例题、让概念可观察的演示，以及学生直觉出错的地方。年龄段较低的一端（12 到 14 岁）跟随概念和算术；较高的一端（15 到 18 岁）跟随推导并完成项目。

学习 - <https://radar.dataaero.eu/zh-hans/learning/ages-12-18> 2026-10-22

目录

开始之前：为什么一个真实系统值得五节课

第 1 课 - 物理 波与电磁波谱：消息乘着什么传播

第 2 课 - 物理与数学 计时与定位：飞机如何知道自己在哪里，网络又如何找出不肯说的那一架

第 3 课 - 计算机 数字消息：112 位，如何发送，如何捕捉错误

第 4 课 - 物理 传播与作用距离：地球的弧面与平方反比定律

第 5 课 - 物理与工程 天线与接收机：从一道 27 厘米的波到地图上的一个点

项目 - 两到四周 搭建一台接收机，用天空检验物理学生挑战题的答案

下一步 项目，一步一步来

开始之前：为什么一个真实系统值得五节课

12 到 18 岁之间教的物理，大多是零散的：这里一个波的单元，那里一个电磁波谱的单元，计算机课上一个数字数据的专题，地理课上提一句卫星。ADS-B 是一个单一的、正在运行的系统，所有这些零件在其中同时承重，而且班级可以用一台比一本教科书还便宜的接收机观察结果。飞机通过给来自卫星的无线电信号计时来确定自己的位置，这是三边测量和光速。它把结果编码成带循环冗余校验的 112 位，这是二进制编码与差错检测。它把这些位以 1090 MHz 的脉冲位置调制无线电波发射出去，这是电磁波谱、频率与波长。这道波只有沿着一条越过地球弧面的直线才能到达接收机，并且按距离的平方反比衰减，这是几何与能量。一根四分之一波长的调谐天线把它变成电流，这是共振。而一个接收机网络甚至能根据到达时间差为一台沉默的发射机定位，这是卫星问题的反转。下面每节课取其中一项，独立展开，ADS-B 是贯穿始终的实例，而不是点缀。

首页的参考课程以叙述的形式给出了整个系统，班级应在第 3 课之前读它的第 3 章和第 5 章，在第 4、5 课之前读第 6 到 8 章；它的术语表是一份有用的讲义。本页假定您已经读过它，集中讲物理和教学。数值约定全篇一致： $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ ， $f = 1090 \text{ MHz}$ ，高度以米计，距离以公里计，巡航中的飞机除非例题另有说明，取 11000 m（飞行高度层 360）和 250 m/s。

关于直觉的两点提醒。学生来的时候相信无线电波是一种声音，相信“雷达”或“卫星”看见飞机。两者都是错的，第 1、2 课都会明确处理，而且两者都会再次出现；课程的设计使得后面每一节课都给您一个新的理由去纠正它们。另外，对公式得心应手的学生，对数量级往往并不得心应手：课程在每一步都大量地问“那有多大？”，因为每微秒 300 m、145 dB 的路径损耗和 2^{24} 个地址，正是让物理变得真实的那种数字。

第 1 课 - 物理

波与电磁波谱：消息乘着什么传播

从整门课程所依赖的观察出发：飞机的无线电消息和一束光是同一种物理现象。两者都是电磁波，是振荡的电场和磁场在没有任何介质的空间中传播，速度 c 在真空中对每一个频率都相同，在空气中也几乎如此：299792458 m/s，班级可以取 3.00×10^8 m/s。把无线电与可见光、可见光与 X 射线区分开的，只是振荡的频率 f 。我们的视网膜响应大约 4×10^{14} 到 8×10^{14} Hz 之间的频率，我们把它感知为从红到紫；ADS-B 以 1.09×10^9 Hz 发射，大约低五十万倍。这道波在种类上没有任何不同；只是我们的眼睛有选择性。

为班级推导波动方程，而不是直接陈述它。如果一道波以速度 c 传播、每秒振荡 f 次，那么一秒钟内它前进了距离 c ，并产生了 f 个完整的周期；因此每个周期占据长度 c/f 。这个长度就是波长 λ ，于是 $c = f \times \lambda$ 。用于 ADS-B： $\lambda = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275$ m。飞机与接收机之间的消息，波峰相距 27.5 cm。让班级把它放到自己画的波谱上，用对数坐标轴：调频广播 100 MHz 和 3 m，ADS-B 1090 MHz 和 27.5 cm，手机 1800 MHz 和 17 cm，Wi-Fi 和微波炉 2450 MHz 和 12 cm，红外线，可见光 5.6×10^{14} Hz 和 540 nm，一直到 X 射线。把飞机的波放在手机和微波炉之间这个练习，比任何表格都有价值，因为它说明了这些都是近邻。

现在正面迎击声音的混淆，因为它普遍存在，也因为这个对比能同时教会两种现象。声音是介质中的纵向压力波；它的速度是介质的性质，20 度空气中为 343 m/s，水中约 1500 m/s，真空中为零。无线电是横向电磁波，根本不需要介质，在真空中以 c 传播，在空气中只是察觉不到地慢一点。给这个差距一个数字： 3.00×10^8 除以 343 约为 875000。30 km 外的一架飞机在同一瞬间发出一个声音和一条消息，消息 100 微秒后送达，声音 87 秒后送达；等声音到达时，飞机已经飞了 22 km。演示是教室里的一根绳子和操场对面的一支手电筒：绳波显然需要绳子，而且以绳子决定的速度传播；手电筒的闪光到达另一头时，没有任何人能测出延迟。明确列出绳子与光共有的东西（波、波长、频率、固定的速度，因而 f 与 λ 成反比）和不共有的东西（介质、每秒若干米的速度）。

以极化收尾，它演示起来成本低，在第 5 课会有回报。电磁波的电场在与传播方向垂直的某个确定方向上振荡。飞机应答机的天线是竖直的，所以 ADS-B 波是垂直极化的；接收天线也必须竖直，转成水平后几乎什么也听不到。竖直抖动的绳波能穿过纸箱上的竖直缝，会被水平缝挡住；两片偏振膜（取自一副廉价的 3D 眼镜）交叉着对着窗户，对光显示同样的现象。请班级预测，如果把接收天线平放，接收会怎样。他们将在项目中检验这个预测。

布置的例题

第二套 ADS-B 系统，美国轻型飞机使用，在 978 MHz 发射。它的波长是多少，为它制作的四分之一波长天线有多长？（0.307 m；7.7 cm。）能做出这道题的学生，就掌握了第 1 课。

第 2 课 - 物理与数学

计时与定位：飞机如何知道自己在哪里，网络又如何找出不肯说的那一架

飞机广播的关于自身位置的一切都来自卫星导航，而卫星导航归根结底是对时间的测量。每颗 GNSS 卫星在约 20200 km 的轨道上运行，携带一台原子钟，发射一个声明自身位置和精确发射时刻的信号。接收机记下到达时刻。两者之差乘以 c ，就是到那颗卫星的距离，一个这样的距离把接收机放在以卫星为中心、以该距离为半径的球面上。让班级推导个数：两个球面相交于一个圆，三个相交于两个点，其中一个远离地球表面，可以舍去。所以，只要接收机里有一台完美的时钟，三颗卫星就够了。它没有这种东西；石英振荡器的漂移远大于所需的纳秒。解决办法，也是这门学问优雅的核心，是把接收机的时钟误差当作第四个未知

数，并使用第四颗卫星：四个未知数（ x 、 y 、 z 和时钟偏移）的四个方程，连续求解。因此 GNSS 接收机需要四颗可见卫星，而作为副产品，它能把时间保持在几十纳秒以内，这就是为什么第 5 课网络中的接收机和飞机一样用这些卫星来校准时钟。

把数量级写在黑板上，并不断回到它们。光在一纳秒内走 0.300 m，一微秒内走 300 m。1 微秒的计时误差就是 300 m 的距离误差；现代接收机几米的精度对应于十纳秒量级的计时。从正头顶的卫星传来的时间是 $20200 \text{ km} / 3.00 \times 10^5 \text{ km/s} = 0.0673 \text{ s}$ ，从近地平线的卫星约 0.086 s，所以接收机是在测量几毫秒的差值，精度达到它的亿分之一。问班级如果某颗卫星的时钟快了一微秒会怎样；他们应当看出，每一台使用它的接收机都会沿着朝向它的方向被推开约 300 m，这就是为什么卫星时钟每天要从地面校正好几次。

把两种高度分开，因为消息两者都带，而学生总会问。卫星解给出的是相对于地球参考椭球的几何高度。飞机报告的却是气压高度：机身外的静压通过国际标准大气换算成高度，该标准假定海平面 1013.25 hPa、15 度，每公里下降 6.5 度。在实际气压偏离标准的日子，每架飞机的气压高度都偏差同样的量，而这正是间隔所需要的：两架分别读作飞行高度层 350 和 360 的飞机，无论天气如何都相隔 1000 ft。ADS-B 位置消息以 25 英尺为步长携带气压高度；速度消息携带气压高度与几何高度之差，所以接收机两者都能还原。对高龄组，ISA 关系式 $p = p_0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^{5.255}$ 是一个很好的电子表格练习：把它反解，由 p 求 h ，并验证 11000 m 对应约 227 hPa，即海平面气压的五分之一。

现在把问题反过来。有些飞机在 1090 MHz 上发射却没有卫星位置：较老的应答机回答雷达时只给身份和高度，或者飞机的 GNSS 被干扰。一个接收机网络仍然能为它们定位。假设四台时钟同步的接收机记录下同一次发射的到达时间。发射机未知，接收机已知：这是把已知与未知互换了角色的 GNSS 问题。一条比到达接收机 B 早一微秒到达接收机 A 的消息，是从一个离 A 比离 B 近 300 m 的点发出的，这类点的轨迹是一个以 A 和 B 为焦点的双曲面。四台接收机给出三对独立的组合，即三个双曲面，它们的交点就是飞机。这就是多点定位，它需要接收机的时钟一致到约 100 ns，而这正是它们从卫星获得的。对班级，用操场练习把它降到二维：三个拿秒表的学生站在测定好的位置上，第四个藏在某处拍手，三人记录经反应时间修正后的延迟，班级以 343 m/s 画出双曲线（或者更简单地，在比例图上试探位置）来找出拍手的人。然后问，要用无线电在 200 km 上做同样的事，计时精度得达到多少，让他们体会秒表与原子钟之间的差距。

布置的例题

相距 60 km 的两台接收机记录到同一条消息，到达时间相差 50 微秒。飞机离第一台接收机近多少？

（15 km。）如果两台时钟相对误差为 1 微秒，会给答案带来多大误差？（300 m。）能解释为什么第二个答案与距离无关的学生，就理解了多点定位的要求。

第 3 课 - 计算机

数字消息：112 位，如何发送，如何捕捉错误

飞机的应答机以 Mode S 扩展电文的形式发送 ADS-B 数据：一个 8 微秒的前导码，随后是 112 个数据位，恰好每微秒一位。从前导码开始这一课，因为它回答了一个学生还没想到要问的问题：当信道里满是噪声和其他飞机时，接收机怎么知道一条消息开始了？前导码是四个脉冲组成的固定图样，位于 0、1、3.5 和 4.5 微秒处。解码器不停地寻找这个图样；一旦找到，它既知道后面跟着一条消息，也精确地知道每个比特时隙从何时开始。学生接触过的每一种数字协议，从 Wi-Fi 到二维码，都有对应的东西，此时正好可以点明。

然后是调制。无线电只能开或关；怎么发送 1 或 0？ADS-B 使用脉冲位置调制：每个一微秒的比特时隙分成两半，前半有脉冲、后半静默表示 1，先静默、后有脉冲表示 0。在黑板上把几个比特画成脉冲，让班级读出来。然后问为什么这比“有脉冲是 1、没脉冲是 0”这个显而易见的方案更好。稍加提示，两个理由就会

浮现。每个比特总是恰好一个脉冲，所以接收机即使遇到一连串的 0 也能保持计时锁定；而且它可以通过问哪一半更响来判定每个比特，而不是问脉冲是否超过了某个绝对门限，这使解码对信号碰巧有多强不敏感。在朴素方案里，一长串 0 与静默无法区分；在 PPM 里，它是一串稳定的后半段脉冲鼓点。

脉冲位置调制中的四个比特：1、0、1、1



每个时隙 1 微秒。脉冲在前半段：1。脉冲在后半段：0。

现在是 112 位的布局，班级在这一课结束时应当能凭记忆复述。第 1 到 5 位是下行格式，来自应答机的 ADS-B 为 17。第 6 到 8 位是能力码。第 9 到 32 位是 24 位的 ICAO 地址，飞机的永久身份。第 33 到 88 位是 56 位的消息字段，其前五位，即类型码，说明其余 51 位包含什么：识别消息（类型码 1 到 4）以八个 6 位字符携带八字符的呼号；空中位置（9 到 18）携带 12 位气压高度、一个说明这是偶帧还是奇帧的标志，以及各 17 位的编码纬度和经度；速度消息（19）携带地速的东西和南北分量、垂直速率，以及气压高度与几何高度之差。第 89 到 112 位是 24 位的校验。布置算术：24 位地址给出 $2^{24} = 16777216$ 架飞机；八个 6 位字符各允许 64 个符号，足够容纳字母、数字和空格；12 位高度以 25 英尺为步长覆盖 102400 英尺；而 17 位的纬度，若在 180 度上朴素地使用，分辨率只有 1.4 km，这就引出了紧凑位置报告所回答的问题。用一段话解释 CPR：这 17 位给出区域内精确到几米的位置，而不是哪个区域；飞机在偶、奇两套区域网格之间交替，各收到一条的接收机就能毫不含糊地确定区域，然后用单条消息跟踪。这是利用时间从同样的比特中获得更高精度的一个漂亮例子。

DF	CA	ICAO 地址	ME - 有效载荷	PI
5 位 下行 格式	3 位 能力	24 位 飞机的唯一身份	56 位 位置、高度、速度、呼号或状态，取决于其前 5 位中的类型码	24 位 差错校验 (CRC)

给班级一条真实的消息，让他们解剖。十六进制字符串 8D4840D6202CC371C32CE0576098 有 28 个十六进制数字，即 112 位。把前两位 8D 转成二进制得到 10001 101：DF = 17，CA = 5。接下来六位 4840D6 是 ICAO 地址，分配表把它分配给荷兰。随后的数字 20... 以 00100 开头，类型码 4，一条识别消息，解码后面的 6 位字符得到呼号 KLM1023。最后六位 576098 是校验。有电子表格或几行 Python 的班级可以在一节课内完成整个解码，而拿到一串十六进制就能说出“这是一架 KLM 的飞机在报告它的航班号”，正是要达到的成果。

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D：下行格式 17，能力 5。4840D6：ICAO 地址，分配给荷兰。20...：类型码 4，识别消息，呼号 KLM1023。
576098：24 位校验。

以校验收尾，因为它是最值得展开的计算机概念。在繁忙机场上空，不同飞机的消息在接收机上不断重叠，脉冲也会被噪声吞掉；解码器不可避免地会拼出错误的位。末尾的 24 位字段是循环冗余校验：88 个消息位被当作一个很长的二进制数，用一种减法即异或的特殊算术，除以一个固定的 25 位生成多项式；余数就是 CRC。接收机对自己解码出的位重做除法并比较。任何一个损坏的位、任何两个，以及任何长度不超过 24 位的突发错误，都会改变余数，于是损坏的消息被拒收。用手算一个 8 位消息的 4 位 CRC 在小规模上演

示这个思想，或者用条形码校验位这个更简单的类比；然后让高龄组用几行代码实现真正的 CRC-24，验证示例消息的校验结果正确，并验证翻转一位就会使它失败。这是每一个现代系统都在用的差错检测，而在这个语境中，一个漏掉的错误可能在管制员的屏幕上放出一架幽灵飞机。

布置的例题

一次完整的发射持续多久？如果应答机每秒发送 4.5 条扩展电文，它发射 ADS-B 的时间占比是多少？（120 微秒；每秒 540 微秒，0.054%。）忽略信道上发射的其他一切，原则上多少架飞机可以共用这个信道而不至于让它持续繁忙？（约 1850 架，这就是为什么最繁忙空域的拥塞是一个真实的工程问题。）

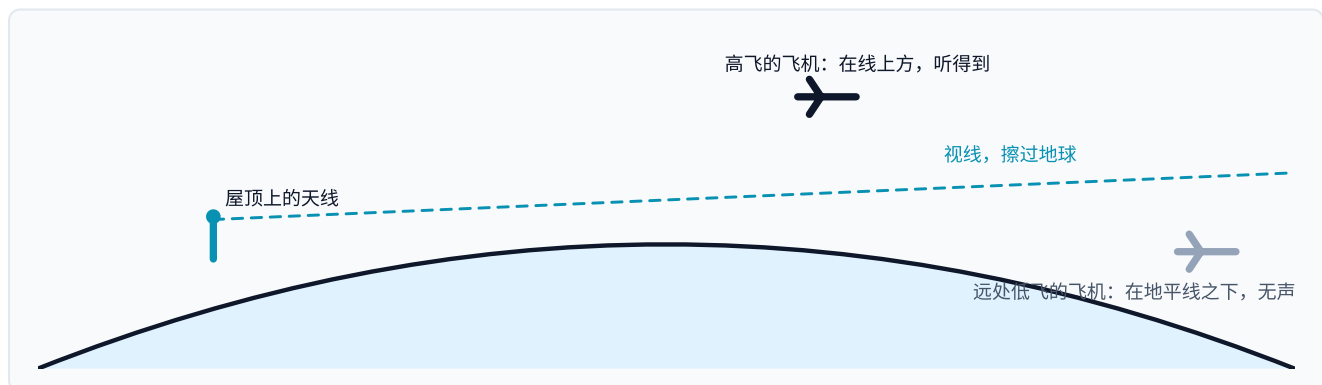
第 4 课 - 物理

传播与作用距离：地球的弧面与平方反比定律

接收机能听到多远的飞机？这个问题有两个独立的答案，几何的和能量的，这一课的目的是推导两者，并发现设计者安排它们彼此一致。先看几何。在 1090 MHz，无线电不会有效地绕地球衍射；它的行为像光，沿直线传播。因此接收机只能听到其地平线之上的飞机，也就是从飞机到天线的直线不穿过地面的飞机。和班级一起推导地平线距离。半径为 R 的球面上方高度 h 处的天线，看到的地平线是其视线与球面相切的地方。切线、到切点的半径和到天线的半径在切点处构成直角，所以由勾股定理 $d^2 + R^2 = (R + h)^2$ ，得 $d^2 = 2Rh + h^2$ 。由于 h 相对于 R 极小， $d = \sqrt{2Rh}$ 。取 $R = 6371 \text{ km}$ ， h 以米计， d 以公里计 $= \sqrt{2 \times 6371 \times h / 1000} = 3.57 \sqrt{h}$ 。大气密度及其折射率随高度下降，使无线电射线略微向下弯曲；标准修正把地球当作半径是真实值四分之三倍的球体，用 4.12 代替 3.57。从高度 h_1 的天线到高度 h_2 的飞机的完整视线，是两个地平线距离之和：

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad h_1, h_2 \text{ 以米计}$$

天线在 20 m 高的屋顶上，飞机在 11000 m： $4.12 \times (4.47 + 104.9) = 451 \text{ km}$ 。同一天线，飞机在 1000 m： $4.12 \times (4.47 + 31.6) = 149 \text{ km}$ 。30 km 外跑道上的飞机： $4.12 \times (4.47 + 2) = 27 \text{ km}$ ，所以听不到。



让班级以本校天线的高度画出 d 随 h_2 变化的曲线；这条先陡后平的曲线解释了每一台接收机覆盖范围的形状：对巡航交通是 400 km 以上的圆，对进近中的飞机是几十公里，对地面上的飞机则一无所获，除非是隔壁的机场。它也解释了为什么高度比接收机的任何其他性质都重要，以及为什么您与机场之间的一座山、或者飞机侧倾转离时自己的机翼，会瞬间切断航迹。小学课程里的操场演示，站在长凳上比蹲着看得远，对这个年龄段并不掉价，只要您接着给出推导；要点在于他们现在知道了为什么。

现在是能量。应答机以几百瓦的峰值功率辐射，在各个水平方向上大致均匀。在距离 d 处，这份功率散布在面积为 $4\pi d^2$ 的球面上，所以固定有效面积的天线截获的功率按 $1/d^2$ 下降：这就是平方反比定律，班级应当从球面面积推导它而不是死记。距离加倍，功率四分之一；十倍，百分之一。无线电工程师用分贝表示各向同性发射机与各向同性接收机之间的损耗，标准公式如下，高龄组可以直接采信，也可以从天线有效面积 $\lambda^2/4\pi$ 推导：

$$\text{路径损耗 (dB)} = 20 \log_{10}(d, \text{单位 km}) + 20 \log_{10}(f, \text{单位 MHz}) + 32.44$$

在 400 km 和 1090 MHz: $20 \times 2.60 + 20 \times 3.04 + 32.44 = 52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 \text{ dB}$ 。250 W 的发射机是 +54 dBm；接收功率为 $54 - 145 = -91 \text{ dBm}$ ，约 $8 \times 10^{-13} \text{ W}$ ，即一万亿分之一瓦。

如果班级没有接触过分贝，花几分钟讲一讲，因为它把跨越十四个数量级的乘法变成了加法，也因为这个数字本身很有教益：屋顶上的接收机检测的是比离开飞机时弱 $10^{14.5}$ 倍的信号。一台好的业余接收机可以解码到约 -100 dBm，所以在 400 km 处还有约 9 dB 的余量，也就是说，对一架巡航中的客机，能量极限和几何地平线落在同一个地方。这不是巧合；应答机功率和接收机标准的规定，就是要让一架飞机在地平线之内可闻、而超出不多，以免信道被邻国的发射淹没。

给高龄组的两个细化。第一，多普勒：以 250 m/s 接近的飞机使接收频率偏移 $f \times v/c = 1.09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908 \text{ Hz}$ ，不到载波的百万分之一，接收机从不在意；对比飞机声音可听见的多普勒频移，那里 v/c 是 $250/343$ ，飞机经过时音高变化将近一个八度。第二，信号的飞行时间：400 km 以 c 计是 1.33 ms，所以消息中的位置已经旧了 1.33 ms，其间飞机移动了 33 cm；对地图可以忽略，对第 2 课的多点定位则是决定性的，它正是靠这些微秒活着的。

布置的例题

一台装在 10 m 桅杆上的接收机能听到 11000 m 处巡航的飞机，却听不到 130 km 外 600 m 高的一架轻型飞机。这架轻型飞机在地平线之下吗？（地平线： $4.12 \times (3.16 + 24.5) = 114 \text{ km}$ ，所以是。）接收机得多高才能听到它？（需要 $4.12 \times (\sqrt{h_1} + 24.5) = 130$ ，所以 $\sqrt{h_1} = 7.05$ ， $h_1 = 50 \text{ m}$ 。）

第 5 课 - 物理与工程

天线与接收机：从一道 27 厘米的波到地图上的一个点

天线是一段导体，经过的电磁波在其中感应出交变电流；接收天线和发射天线是同一个装置反向运行，这种互易性应当明确告诉班级。当导体发生共振时，感应电流最大：此时它的长度使得沿导体的电流分布恰好与波的振荡相吻合，正如长度合适的琴弦与特定的音共振，或者秋千与特定节奏的推动共振。直导体的基频共振在半个波长处，1090 MHz 时为 13.75 cm，电流在中间最大、两端为零。实用的 ADS-B 天线，在飞机上和大多数接收机上，是四分之一波长单极天线：一根 6.9 cm 的竖直振子立在导电地平面上，地平面在电学上形成它的镜像，于是振子与镜像合起来构成半波偶极子。在飞机上，机身就是地平面；一根买来的 1090 MHz 天线把同样的几何结构藏在它的管子里，叠放好几层，以便把灵敏度集中到地平线方向。在课堂上用一根 6.9 cm 的金属棒立在罐头盖上做一个模型，就能展示这种几何结构和长度，用尺子量一量，与 27.5 cm 的电波对照；不过项目的接收机用的是出厂调谐的天线，因为几毫米的误差就会让自制天线失谐，它只能听到天空的一小部分。

展开方向图，因为它预言了班级可以观察到的现象。竖直单极天线向地平线方向辐射和接收最强，沿自身轴线方向则完全不辐射、不接收；它的灵敏度在三维空间中画出来是一个环形甜甜圈，天线穿过中间的洞。所以接收机通常能完美地听到 300 km 外的飞机，却会把正从头顶经过的那一架丢失几秒钟，班级可以在自己

的接收机上看着这件事发生。共线天线，即多个谐振单元叠放，把甜甜圈压得更扁，在远处飞机所在的地平线方向提高灵敏度，代价是头顶的空洞变大：这就是天线增益，以 dBi 表示，它来自灵敏度的重新分配，绝不是凭空创造。第 1 课的极化现在有了项目将检验的实际后果：天线必须竖直。

天线和计算机之间有三个阶段，每一个都是一堂小课。带通滤波器让 1090 MHz 通过，拒绝几百兆赫之外强得多的手机发射，否则它们会使放大器饱和。低噪声放大器放在天线处而不是接收机处，在信号进入电缆之前把它放大一千倍；顺序很要紧，因为同轴电缆在 1090 MHz 上大约每十米损失一半的信号，即 3 dB，在损耗之后放大会把电缆的噪声连同信号一起放大。然后是软件定义无线电：一个原本作为电视调谐器制造的 20 欧元 USB 设备，它把信号混频到基带，并以每秒两百万次采样成一串数字。从这一点起，无线电问题就是编程问题了。免费软件在样本流中扫描前导码图样，测量每个微秒时隙的哪一半携带更多能量，拼出 112 位，计算 CRC，若通过则解码各字段。跟踪器随后配对奇偶位置帧，按 ICAO 地址合并位置、速度和识别信息，并保持每架飞机的状态直到消息停止到达。

把这条链条交给班级，让他们自己画成图，并标出每个阶段的量：天线处纳伏级的交变电流；放大器之后的微伏；SDR 输出的每秒两百万个 8 位数；解码器输出的 112 位帧，也许每秒几百条；跟踪器输出的每架飞机一条记录。要落实的要点是，地图上的一个点是一条链条的远端，其中每一环都是他们现在理解的概念：共振、滤波、放大、采样、模式匹配、解码、差错校验、汇聚。

布置的例题

一根电缆在 1090 MHz 上每 10 m 损耗 3 dB。那么 20 m 的一段损失信号的几分之几？（6 dB，四分之三。）如果接收机的极限是 -100 dBm，而 400 km 外飞机在天线处的信号是 -91 dBm，没有放大器信号能挺过电缆吗？（勉强可以：-97 dBm。再多一点损耗，接头上的雨水或更长的一段电缆，地平线处的飞机就消失了。这就是为什么放大器要放在天线处。）

项目 - 两到四周

搭建一台接收机，用天空检验物理

这个项目把五节课变成测量。设备是一个 USB 软件定义无线电接收棒（约 25 欧元）、一根出厂调谐的 1090 MHz 天线（50 到 70 欧元）、几米同轴电缆，以及一台运行某个免费解码器（dump1090 及其后代是标准选择）的笔记本电脑或 Raspberry Pi（树莓派）。安装需要一个下午，软件在几分钟内就会显示一张飞机表，包括它们的 ICAO 地址、呼号、位置、高度和速度，还有一张地图。项目中的一切都只接收；没有任何东西发射，班级应当明白在航空频率上发射既违法又危险。进入屋顶需要学校的常规批准；朝向主要航路的高层窗户是一个完全不错的起点。本站的“成为数据贡献者”页面一步一步地讲解同样的安装过程，并让学校的接收机为实时地图提供数据。

第一项研究是无线电地平线。解码器为每架飞机报告最后一次听到它时的距离和高度。在一天之内，收集若干高度区间内飞机被接收到的最大距离，画出距离随高度变化的图。学生有第 4 课的公式和天线高度；他们应当在看到数据之前预测曲线，然后比较。对高飞的飞机，吻合通常很好，对低飞的飞机则较差，而讨论为什么（建筑物、地形、天线的头顶空洞、飞机自身的遮挡）正是理论与测量之间那种教科书无法提供的交锋。软件绘制的各方向最远飞机图，把整个地区的地形作为覆盖范围里的阴影显示出来。

第二项是天线。比较天线在室内、窗边和屋顶上，竖直和平放，立在金属表面上和远离任何金属时的消息速率和最大距离。每一项比较都检验第 1 课和第 5 课的一个具体论断，每一个结果都应当先预测。极化测试最为触目：平放之后，天线丢掉了大部分飞机。

第三项是数据。记录一整天的交通，向它提问：最繁忙的小时，巡航高度的分布（学生预期是分散的，结果发现大多数客机在 10000 到 12000 m 之间），最近机场离场飞机的爬升率，飞机经过最频繁的国家（由 ICAO 地址分配得出）。高龄组可以从软件记录的十六进制中自己解码原始消息，并在自己的代码中验证 CRC。如果班级在 30 公里或更远的合作学校有第二台接收机，两台都输出带 GNSS 时间戳的数据，就可以尝试对两台都能听到的一架飞机做二维多点定位，并与飞机广播的位置比较：这是课程最有雄心的成果，而且是真实的。

以这个系统提出却不回答的问题收尾。消息没有签名，所以一台发射机可以广播一架幽灵飞机；是什么在保护系统，一个带签名的版本要付出什么代价？飞机依赖可能被干扰的卫星；当卫星被干扰时，管制员的图景会怎样？数据标识飞机，而飞机可以标识一个人；谁应当有权跟踪谁？搭建过接收机的班级已经赢得了这些问题，它们是很好的期末论文或辩论题目。

学生挑战题的答案

学生页面布置了八道挑战题，每课一到两道，可以用作家庭作业或课程结束测验。答案，连同满分回答应包含的推理如下：

- 1090 MHz 的波长： $\lambda = c / f = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275 \text{ m}$ 。四分之一波长振子：6.9 cm。推理： $c = f \times \lambda$ ，固定的光速迫使两者成反比。
- 光比声音快 $3.00 \times 10^8 / 343$ ，约 875000 倍。在 30 km 上，消息用 100 微秒，声音用 87 s；以 250 m/s 飞行的飞机在这段时间里移动 22 km。
- 2 微秒的时钟误差给出 $2 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 = 600 \text{ m}$ 的距离误差。需要四颗卫星，因为接收机的时钟偏差是与 x、y、z 并列的第四个未知数。
- $2^{24} = 16777216$ 个地址。112 位消息以每微秒 1 位计持续 112 微秒，加上前导码为 120 微秒。
- 在 8D4840D6... 中，8D 是 10001101：前五位 10001 是 17，所以 DF = 17，一条来自 Mode S 应答机的 ADS-B 消息；接下来三位 101 给出 CA = 5。4840D6 是 ICAO 地址。
- 从 15 m 天线到 9000 m 高飞机的无线电地平线： $4.12 \times (3.87 + 94.9) = 407 \text{ km}$ 。对 300 m 高的飞机： $4.12 \times (3.87 + 17.3) = 87 \text{ km}$ 。
- 距离加倍使接收功率变为四分之一，因为同样的发射功率散布在面积四倍的球面上。200 km、1090 MHz 的路径损耗： $20 \times 2.30 + 60.7 + 32.4 = 139 \text{ dB}$ ，比 400 km 处少 6 dB，与四倍的因子一致。
- 平放的天线与垂直极化的波交叉极化，接收极少；感应电流取决于电场沿导体方向的分量。底层的接收机作用距离变短，因为它的地平线距离 $4.12 \times \sqrt{h_1}$ 缩小了，也因为建筑物挡住了视线。

下一步

项目，一步一步来

第 6 课的项目假定已有一台接收机；动手工作坊把它搭出来。它是为从未用过 Raspberry Pi 的人写的：带价格的购物清单、该选哪根天线、它的安放和电缆损耗、准备 Pi、安装 Dataero 共享程序的三条命令、认领站点、调校增益，以及五项测量，每课一项，用天空检验物理。一个向 Dataero 共享数据的站点，给班级一个控制面板、一张覆盖范围地图和一年的历史数据可用。

打开动手工作坊 <https://radar.dataero.eu/zh-hans/learning/workshop>