

参考课程 - 面向所有成年人

ADS-B 是什么，它如何工作

共十二章。不要求任何航空或无线电方面的预备知识；中学数学足以看懂例题，跳过例题也不会丢失主线。阅读时间约 50 分钟。

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

目录

- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| 第 1 章 问题：满天的飞机，却没有人看得见 | 第 8 章 - 物理 天线：捕捉一道 27 厘米的波 |
| 第 2 章 ADS-B 之前：用雷达寻找飞机 | 第 9 章 接收与解码 |
| 第 3 章 思路：让飞机自己告诉我们 | 第 10 章 从一台接收机到一张大陆地图 |
| 第 4 章 飞机如何知道自己在哪里 | 第 11 章 它有什么用，又在哪里力有不逮 |
| 第 5 章 一条消息的解剖 | 第 12 章 简史 |
| 第 6 章 - 物理 波：作为看不见的光的无线电 | 术语表 |
| 第 7 章 - 物理 作用距离：地球的弧度与信号的衰减 | 下一步 从理论到实践：搭建接收机 |

第 1 章

问题：满天的飞机，却没有人看得见

在一个普通的工作日，约有 30000 个航班穿越欧洲空域。一架巡航中的客机每秒前进约 250 米，即 900 km/h；两架迎面飞行的飞机，每秒就接近半公里。飞行员望向窗外，几乎什么也看不到：在 10000 米的高度上，其他飞机只是一个个小点，而且大多数本来就被云层遮住了。天空是一张三维的公路网，路面上却没有画任何道路，上面的交通既快又看不见。

空中交通管制存在，就是为了让这些交通彼此分开。规则在原理上很简单：在管制空域内，飞机之间要保持至少 1000 英尺（约 300 米）的垂直间隔，或者一段规定的水平间隔，在雷达覆盖范围附近通常是 5 海里（9.3 km），在大洋上空则远得多。要执行这些规则，管制员必须持续、可靠地知道扇区内每一架飞机的位置：不是一分钟前它在哪里，而是此刻它在哪里、飞多高、朝哪个方向飞。这门课程的全部主题，就是这种知识是如何获得的。它的专业名称叫做**监视**。

一个值得记住的数字

以 900 km/h 飞行时，一架飞机一分钟前进 15 km，一秒钟前进 250 m。任何更新缓慢或误差很大的监视方法，都会让管制员恰恰在最要紧的那段距离上只能靠猜。

第 2 章

ADS-B 之前：用雷达寻找飞机

第一个答案是一次**雷达**，它诞生于 20 世纪 30 年代末，在第二次世界大战期间走向成熟。一面巨大的旋转天线发出一个短促而极其强大的无线电能量脉冲。脉冲打到飞机上，有极小一部分被反射回来。雷达测量脉冲发出到回波返回之间的时间；由于无线电以光速传播，即 300000 km/s，这段时间就给出了距离。天线当时所指的方向则给出方位。一次雷达有一个美妙的优点，就是完全独立：飞机上不需要任何设备，所以军

方至今仍在使用它。但它也有实实在在的弱点。远处飞机的回波极其微弱，所以发射机必须非常庞大。回波说不出这架飞机是谁，也说不出它飞多高。而且天线转一圈要好几秒，所以每架飞机每 4 到 12 秒才被看到一次，这段时间里它已经移动了多达 3 km。

第二个答案是**二次监视雷达**（SSR），它让飞机成了参与者。地面站在 1030 MHz 上发出一个问题，称为*询问*。机上一台小小的无线电设备，即**应答机**，听到问题后在 1090 MHz 上用自己的强信号作答。由于应答是主动发射而不是反射，它比雷达回波强数百万倍；又由于应答是由计算机生成的，它可以携带信息。在最早的形式（Mode A）中，应答包含管制员指定的一个四位数识别码；在 Mode C 中，它还包含飞机的高度。20 世纪 80 年代出现了 **Mode S**（“S”代表 selective，选择性），每台应答机都有一个唯一的 24 位地址，可以被单独询问，并能以 56 位或 112 位的数据消息作答。请记住这个数字 1090 MHz 和这个词 Mode S：ADS-B 正是直接建立在这两者之上的。

二次雷达是一个巨大的进步，但它仍然与前辈共有两个局限。飞机只有被问到才说话，所以地面仍然需要一座在作用距离之内的询问站，这就把海洋、沙漠和山脉排除在外了。而且地面站仍然需要一面旋转天线才能知道应答来自哪个方向，所以每架飞机仍然是每转一圈才被看到一次，管制员屏幕上仍然是一个每隔几秒跳一下的点，而不是一架平滑移动的飞机。要再进一步，就需要某种根本不同的东西：让飞机不必被问就报告自己的位置，而地面根本不必测量任何东西。

第 3 章

思路：让飞机自己告诉我们

到 20 世纪 90 年代，两项技术已经成熟，使得另一条路成为可能。卫星导航让每一架装备合适的飞机都能精确地知道自己的位置，远比任何雷达从地面测得的更好。而 Mode S 应答机已经提供了一台能在 1090 MHz 上发送数据消息的无线电设备。把两者放在一起，逻辑就无法抗拒了：与其让地面费力去测量飞机在哪里，不如让本来就知道的飞机自己定期说出来，说给所有人听。这就是 ADS-B，它名字里的四个词正是一段精确的描述。

它是**自动的**（automatic）：没有任何东西触发发射。应答机按自己的节奏发送，大约每秒两次，不管有没有地面站在作用距离之内，也不管飞行员做什么；事实上，飞行员在飞行中除非关掉应答机否则无法让它停下，而关掉应答机是被禁止的。它是**相关的**（dependent）：消息中的每一项都来自飞机自己的设备，位置来自它的卫星接收机，高度来自它的气压高度表，地面什么也不测量，只是相信它被告知的内容。它是**监视**（surveillance）：它的目的是让别人知道飞机在哪里，服务于空中交通管制和附近的飞机；这有别于导航，导航是飞机自己知道自己在哪里；也有别于通信，通信是和飞行员说话。它还是**广播**（broadcast）：消息没有收件人，没有确认，也没有加密，任何在作用距离内拥有接收机的人听到的都是一模一样的内容，不管他是管制中心、另一架客机，还是一所学校。

“相关”是让工程师们担心的那个词，也是最值得解释的一个。雷达做的是独立测量：飞机的仪表错了，雷达并不在乎。而 ADS-B 继承了飞机自身导航系统的每一个误差，如果那套系统被欺骗或者失效，广播出来的位置就会以同样的自信程度出错。正因如此，每条 ADS-B 消息在位置之外还附带一项声明，说明飞机对自己位置的信任程度（我们将在第 5 章遇到的完好性和精度等级）；也正因如此，雷达并没有被关掉。

“广播”则是让这门课程成为可能的那个词。由于消息是明文发给所有人的，听到它的不仅是空中交通管制，还有任何调到 1090 MHz 的接收机，包括你可能放到学校屋顶上的那一台。同样的性质也是这个系统主要局限的根源，第 11 章会讨论：任何人都能读的消息，也是任何人都能伪造的消息。

第 4 章

飞机如何知道自己在哪里

ADS-B 的一切都建立在飞机知道自己位置的基础上，所以这一章讲卫星导航。它的通称是 **GNSS**，全球导航卫星系统；美国的 GPS 最为人熟知，欧洲的 Galileo（伽利略）、俄罗斯的 GLONASS 和中国的 BeiDou（北斗）工作原理相同。每个系统都是一个由大约 24 到 30 颗卫星组成的星座，在约 20000 km 的高度上运行，远在飞机之上，每颗卫星都携带一台精确到十亿分之几秒的原子钟。每颗卫星持续发射一个无线电信号，内容大意是：“我是第 N 号卫星，我的位置是某某，我发出这条信号的时刻正好是 T。”

飞机上的接收机稍晚一点才听到这个信号，因为无线电传播需要时间：以 300000 km/s 的速度，从卫星出发的 20000 km 大约要走 67 毫秒。接收机把消息中标注的时刻与到达时刻相比较。两者之差乘以光速，就是到那颗卫星的距离。一个距离把接收机放在以那颗卫星为中心的一个球面上的某处。两个球面相交于一个圆；三个球面相交于两个点，其中一个通常荒谬（在地下深处或太空远方），可以舍去。所以，如果接收机有一台完美的时钟，三颗卫星就够了。

可它没有。一台原子钟要花几万欧元，而且装不下；接收机里只有一块便宜的石英钟，其误差可能远大于所要求的计时精度。妙处就在这里。接收机把自己的时钟误差当作第四个未知数，与三个位置坐标并列，然后再收听第四颗卫星。四个方程，四个未知数：接收机解出自己的位置，顺带把自己的时钟校正到几十纳秒以内。这就是为什么卫星接收机需要至少四颗可见卫星，也是为什么每一台 GNSS 接收机顺便也是整栋楼里最准的时钟之一。

这些数量级值得细细体会，因为它们说明了卫星导航其实是一门计时的学问，几何只是附带。光在一纳秒内走 30 厘米，在一微秒内走 300 米，所以百万分之一秒的计时误差就变成 300 米的位置误差，而现代接收机几米的精度，对应的是大约十纳秒量级的计时。举一个具体的例子。一颗卫星给信号打上时间戳 12:00:00.000000000；飞机的接收机在 12:00:00.070000000 听到它。传播时间是 0.070 s，所以距离是 $0.070 \times 300000 \text{ km/s} = 21000 \text{ km}$ 。假如接收机自己的时钟快了仅仅一微秒，它算出的就会是 21000.3 km，多了 300 米，而且同样的误差也会悄悄混进其他每一颗卫星的距离里。这个共同的误差，恰恰就是第四颗卫星所暴露并消除的东西。

两种高度，而不是一种

卫星给出的是相对于地球数学表面的高度，即 *几何高度*。然而飞机为空中交通目的广播的高度并不是它，而是 **气压高度**，由机外空气压力推算而来，压力由机身上一个叫静压孔的小开口测得。气压随高度以已知的方式下降（在近地面大约每 8 米降 1 hPa，越高降得越慢），世界上每一台高度表都用同一个标准大气把压力换算成高度，以海平面 1013.25 hPa 为基准。在气压异常的日子里，每架飞机的气压高度都会偏差同样的量，而这正是要点所在：对间隔来说，要紧的不是距海面的真实高度，而是两架都读作“飞行高度层 350”的飞机，与一架读作“飞行高度层 340”的飞机之间，确实相隔 300 米。ADS-B 在位置消息中以 25 英尺（7.6 m）为步长广播气压高度，并另外广播它与卫星高度之间的差值，这样接收机两者都能还原出来。

第 5 章

一条消息的解剖

全世界客机使用的 ADS-B 消息，是一种称为 **扩展电文**（extended squitter）的 Mode S 发射；“squitter”是雷达界的老行话，指主动发出而非应答的发射，“扩展”则是因为它有 112 位，是最初 Mode S 应答长度的两倍。工程师把“1090 MHz 扩展电文”写作“1090ES”。每次发射总共持续 120 微秒：先是 8 微秒的 *前导码*，一个由四个脉冲组成的固定图样，让接收机能识别消息的开头并同步自己的时钟，随后是 112 个数据位，每微秒一位。

一个比特是怎样发出的：脉冲位置调制

每个一微秒的比特时隙被分成两半。前半段有一个无线电能量脉冲、后半段静默，表示 1；先静默、后有脉冲，表示 0。因此不论数据是什么，每个比特都恰好有一个脉冲，接收机只需判断每个时隙的哪一半更响。这种方案叫脉冲位置调制，它对信号从应答机传到远处天线的路上所遭受的各种噪声和衰落都很有抵抗力，而且解码成本低。

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。

这 112 位

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)

前五位是下行格式，说明这是哪一种 Mode S 消息；数值 17 表示“来自 Mode S 应答机的 ADS-B”。24 位的 **ICAO 地址** 是飞机的永久身份，在注册时分配：共有 2 的 24 次方即 16777216 个可能的地址，由联合国的民航机构 ICAO（国际民航组织）成块分配给各国。例如，比利时的飞机使用十六进制 448000 到 44FFFF 之间的地址。与老式 Mode A 的四位数码不同，这个地址从不改变，也从不共用，所以接收机从第一条消息起就能确定自己听到的是哪一架飞机。

56 位的 **ME** 字段是真正的内容，它的前五位是类型码，说明其余部分的含义。类型码 1 到 4 携带飞机的呼号，例如 BEL1234 或 RYR7KL，以八个六位字符表示。类型码 9 到 18 携带带气压高度的空中位置；20 到 22 携带同样的位置但附卫星高度。类型码 19 携带速度：地速分解成东西和南北两个分量、垂直速率，以及气压高度与卫星高度之差。类型码 28、29 和 31 携带状态：紧急代码、选定高度，以及说明广播位置可信程度的完好性和精度等级（比如“NIC”为 8，就承诺真实位置以很高的概率在所报位置 185 m 以内）。

最后 24 位是**循环冗余校验**，一个由前面 88 位经固定的多项式除法算出的数。接收机对自己解码出的位重做一遍这个计算；如果结果不符，就说明至少有一位在传播途中被损坏，这条消息便被丢弃。由于一个一微秒的脉冲很容易被噪声或另一架飞机重叠的消息淹没，正是这项校验把乱码的位置挡在了管制员的屏幕之外。一条真实的消息，按接收机记录下来的样子，是这样的：

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D：下行格式 17，能力 5。4840D6：ICAO 地址，一架荷兰飞机。20...：类型码 4，一条识别消息，解码后得到呼号 KLM1023。576098：差错校验。

把地球装进 34 位

一条位置消息只有 17 位用于纬度、17 位用于经度。这意味着绕整个地球一周只有 131072 级，在赤道上每级约 300 m：远远不够好。ADS-B 用**紧凑位置报告**解决了这个问题。地球被划分成若干区域；这 17 位给出区域内一个非常精确的位置（约 5 m），却不说明是哪个区域。飞机在两套略有不同的区域网格之间交替，即“偶”消息和“奇”消息，收到各一条的接收机就能毫不含糊地确定区域。一旦确定，一条消息就足以跟踪飞机，因为它不太可能在半秒钟内跳到另一个区域。这是一个巧妙的手法，不多花一个比特就把有效精度提高了一倍。

多久发一次

飞行中的应答机每秒发送两条位置消息、两条速度消息，每五秒发送一次呼号，外加间隔更长的状态消息，总共每秒大约四到五条扩展电文。每条持续 120 微秒；应答机真正在发射 ADS-B 的时间远不到千分之一。一秒钟剩下的时间里，它在收听并应答 1030 MHz 上的雷达询问和其他飞机的防撞查询。

第 6 章 - 物理

波：作为看不见的光的无线电

消息以**无线电波**的形式离开飞机，而这门课程里最有用的一个观念就是：无线电波和一束光是同一种东西。两者都是电磁波：电场和磁场一起振荡的图样，以光速 c 在空间中传播， c 等于每秒 299792458 米，差不多就是 300000 km/s。把无线电波与绿光、医院里的 X 射线或厨房微波炉里的微波区分开来的，只是场振荡的快慢：**频率** f ，以赫兹（每秒振荡次数）计量。

由于波以固定的速度传播，频率就决定了一个波峰到下一个波峰的距离，即**波长** λ 。一秒钟内波前进 c 米并完成 f 次振荡，所以每次振荡占据 c / f 米：

$$c = f \times \lambda$$

对 ADS-B: $\lambda = 300000000 / 1090000000 = 0.275$ m。飞机与你的天线之间的那道波，波峰相距 27.5 cm，大约是一把学生尺的长度。

波	频率	波长	说明
调频广播	100 MHz	3 m	汽车天线只有它的几分之一
ADS-B 与 Mode S	1090 MHz	27.5 cm	雷达应答机的应答也用它
手机 (4G 频段)	1800 MHz	17 cm	频谱上的近邻
Wi-Fi、微波炉	2450 MHz	12 cm	频率相同，功率天差地别
可见绿光	560000000 MHz	0.00054 mm	频率高出五十万倍

两个推论对后面的一切都很要紧。第一，既然这道波就是光，它便沿直线传播，除非有东西使它弯折或将它挡住，而且它穿不过地球。这决定了系统的作用距离，是第 7 章的主题。第二，既然它的波长是 27.5 cm，与它相互作用最强的金属结构，也就是天线，尺寸也在这个量级，这是第 8 章的主题。

为什么无线电不是声音

最常见的混淆，成人和孩子一样，是把无线电和声音混为一谈，大概因为“收音机”是一个发出声音的盒子。它们是毫不相干的两种现象。声音是空气中的压力波，是一连串分子推挤邻居；它需要有物质才能传播，速度为 340 m/s，而且无法穿过真空。无线电什么都不需要：它穿过卫星和飞机之间的真空，速度快了将近

一百万倍。飞机的发动机噪声和它的 ADS-B 消息在同一时刻离开飞机；消息在 67 微秒后到达 20 km 外的接收机，声音则要整整一分钟后才到。

为什么是 1090 MHz

这个频率是一份遗产。20 世纪 50 年代的国际协议把 960 到 1215 MHz 的频段保留给航空无线电导航，1090 MHz 成了二次雷达应答机的应答频率。设计 ADS-B 时，重复利用每架客机上已经装好的应答机，远比安装一台新的无线电设备便宜，于是 ADS-B 就干脆成了 Mode S 应答机在 1090 MHz 上说的又一样东西。在美国，飞行高度低于约 5500 m 的小型飞机可以改用第二套系统，即 978 MHz 上的 UAT，这就是为什么那里的接收机常常两个频率都听。

第 7 章 - 物理

作用距离：地球的弧度与信号的衰减

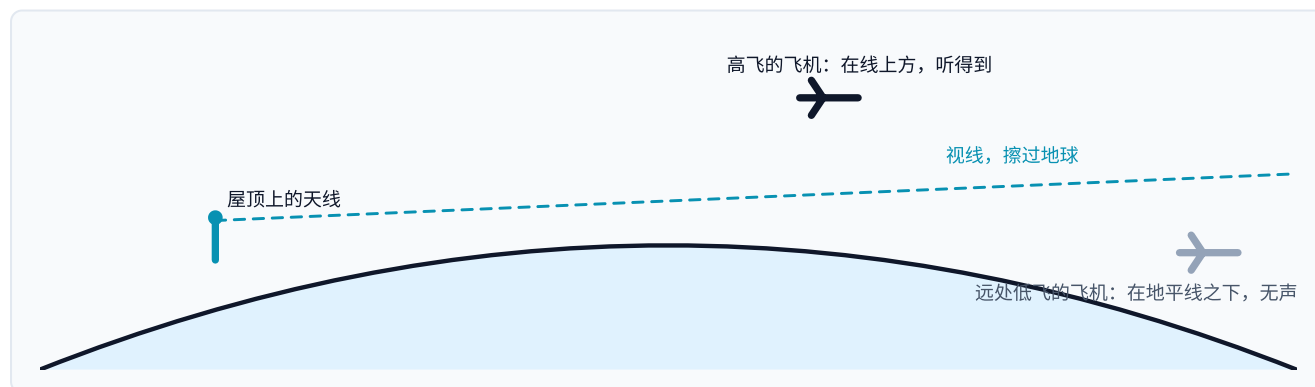
应答机以几百瓦的峰值功率发射。这样的信号能在多远之外被听到？有两样截然不同的东西限制着它，值得把它们分开来看：几何，它划出一道硬边界；功率，它划出一道软边界。

无线电地平线

在 1090 MHz 上，无线电的行为和光一样：沿直线传播，不会绕着地球弯曲。因此地面天线只有在它与飞机之间存在一条不穿过地面的直线时才能听到飞机。对地表的观察者来说，地平线就是这条直线刚好擦过地球的地方。飞机越高，那个相切点就越远；天线越高，又更远一些。球面切线的几何给出一个简单的结果：到地平线的距离（以公里计）约为高度（以米计）平方根的 3.57 倍。大气会让无线电略微向下弯曲，把地平线拉远大约 15%，所以工程师用 4.12 代替：

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h_{\text{飞机}}} + \sqrt{h_{\text{天线}}}) \quad \text{高度以米计}$$

飞机在 11000 m，天线在 20 m 高的屋顶上：4.12 x (104.9 + 4.5) = 451 km。飞机在 1000 m，同一屋顶：4.12 x (31.6 + 4.5) = 149 km。15 km 外停在地面上的飞机：完全听不到，除非两地之间的地势平坦开阔。



这解释了接收机覆盖范围的典型形状：对高空飞行的航班是一个 400 km 或更大的圆，对进近中的飞机缩小到几十公里，对地面上的飞机则几乎为零，除非是隔壁的机场。它也解释了为什么接收机的高度远比接收机的品质重要，以及为什么一座山、一栋高楼，甚至飞机自己的机翼在它侧倾转离你时，都能瞬间切断信号。

平方反比定律

在地平线之内，信号随距离减弱。应答机的天线向水平各个方向辐射，所以它的功率散布在一个越来越大的球面上。球面的面积随半径的平方增长，因此落在固定大小的天线上的功率随距离的平方下降：距离加倍，功率只剩四分之一；距离十倍，功率只剩百分之一。工程师用分贝表示的*路径损耗*来描述它，对 1090 MHz、400 km 的距离，约为 145 dB，意思是接收功率比发射功率小大约 10 的 14.5 次方倍。一个 250 瓦的脉冲到达时只剩约百亿分之一毫瓦。一台好的接收机勉强能检测到它，这就是为什么几何地平线与功率极限恰好都落在几百公里处：系统就是这样设计的。

这两种极限相互作用的方式值得理解。在地平线之内，来自近处飞机的强信号和来自远处飞机的弱信号都能完美解码，因为第 5 章的脉冲位置方案只问每个比特时隙的哪一半更响，而不问有多响。信号并不会随着飞机远去而逐渐失去用处；它一直可以解码，直到在地平线附近的某处，要么几何把它切断，要么接收机里的噪声终于把它淹没，航迹就此中断。这就是为什么覆盖图有清晰的边缘，也是为什么接收机听到的最远的飞机几乎总是飞得最高的那些。

第 8 章 - 物理

天线：捕捉一道 27 厘米的波

天线是一段导体，其形状使得经过的电磁波能让其中的电子步调一致地运动，产生一股接收机可以放大的微弱交变电流。发射机里发生的是相反的过程：飞机天线里的交变电流把波发射出去。这种交换的效率取决于导体尺寸相对于波长的大小。一根直导线在长度为半个波长时响应最强，也就是发生*共振*，此时沿导线来回涌动的电流恰好与波的振荡合拍，就像按秋千自身的节奏去推它。对 1090 MHz 而言，半个波长是 13.75 cm。

最常见的实用形式是**四分之一波长单极天线**：一根四分之一波长、即 6.9 cm 长的竖直杆，立在一个导电面上，这个面叫*地平面*。地平面起镜子的作用，于是杆和它的镜像合在一起，表现得像一根半波天线。这就是为什么飞机上的 ADS-B 天线是机身上一片几厘米高的矮刀形天线，机身就是地平面；也是为什么业余爱好者的天线是插在罐头盖上的一小段导线。长度不对的导线也能用，但效果差得多：这只“金属耳朵”是调过音的。

天线的另外三个性质由物理推出，而且各有看得见的后果。第一是**极化**。电磁波的电场在与传播方向垂直的某个确定方向上振荡，而天线只响应场沿自身长度方向的分量。飞机天线是竖直安装的，所以 ADS-B 波到达时是垂直极化的，接收天线也必须竖直；若把它横放，就几乎什么也听不到，正如一根上下抖动的绳波会被一条水平的缝挡住。第二是**方向图**。竖直天线对地平线方向最灵敏，而沿自身轴线方向完全不灵敏，所以它在三维空间中的灵敏度形状像一个环形甜甜圈，天线穿过中间的洞。因此接收机通常能毫不费力地听到 300 km 外的飞机，却会把正从头顶飞过的那一架丢失几秒钟，这在任何实时地图上都值得留意。把几个谐振单元上下叠放，会把甜甜圈压得更扁，把灵敏度集中到远处飞机所在的地平线方向，代价是牺牲头顶方向；这就是天线**增益**的含义，它永远是灵敏度的重新分配，而不是凭空创造。

第三个性质关乎天线和接收机之间的东西。天线接收到的不只是 1090 MHz，还有附近的每一个信号，包括几百兆赫之外、强得多的手机发射，所以要先放一个只让航空频段通过的滤波器。然后信号还得沿电缆传下来，而在 1090 MHz 上，同轴电缆大约每十米就损失一半信号；补救办法是在天线处、电缆之前放一个低噪声放大器，让信号强到足以挺过这段路程，而不是放在接收机处，因为在那里放大会把电缆的噪声连同残存的信号一起放大。这些是细节，但正是这些细节决定了学校屋顶上的接收机是能听到地平线处的飞机，还是只能听到近处的那几架。

第 9 章

接收与解码

从天线到地图上的一个点，中间是五个阶段组成的链条。天线把经过的波变成几微伏的交变电流。滤波器和低噪声放大器保留 1090 MHz 频段，排除其他一切，并把信号放大一千倍。软件定义无线电调谐到该频率，每秒对信号采样两百万次，把它变成一串数字。解码器在这串数字里搜索前导码图样，读出 112 位，检查校验，并解码各个字段。跟踪器则把来自每架飞机的消息汇集成一条持续更新的记录：一个位置、一条航迹、一个标签。

最了不起的是第三个阶段。直到 2010 年前后，解码 1090 MHz 还需要价值数千欧元的专用硬件。后来业余爱好者发现，一个 20 欧元的 USB 电视调谐器里有一块芯片，可以被指令调到任何频率，并把原始信号交给计算机。这种**软件定义无线电**把一个无线电问题变成了一个编程问题：一台笔记本电脑或一块 Raspberry Pi（树莓派）每秒接收两百万个描述信号强度的数字，免费软件在其中寻找前导码图样，测量每个微秒时隙的哪一半更响，拼出 112 位，计算 CRC，再打印出各个字段。中学套件里的接收机项目正是这条链条，一所学校不到 100 欧元就能把它搭起来。

跟踪器阶段是消息流变成知识的地方。别忘了，单条位置消息在偶消息和奇消息配对之前是有歧义的。速度与位置分开到达，呼号又是另外送来的，跟踪器按 ICAO 地址把它们缝合在一起，丢弃任何通不过差错校验的内容，并保存每架飞机最后已知的状态。如果一分钟内没有消息到达，通常是因为飞机已经降到地平线以下，这条航迹便到期失效。

第 10 章

从一台接收机到一张大陆地图

一台接收机听到的是一圈直径几百公里的天空。一张欧洲地图需要几百台，而有用的那些不在城市里，而是分散开来：在海岸、在山谷、在岛屿上，凡是别的接收机那一圈够不到的地方。每台接收机把自己解码出的消息，每条都标上到达时间，通过互联网发送到一个中央服务。这个服务做**汇聚**：来自一架高飞飞机的同一条消息，通常会同时从十台或二十台接收机到达，这些重复必须被识别并合并。它还做检查：如果一个位置与所有相邻接收机对同一架飞机的观察都不一致，那多半是解码错误或应答机故障，会被标记或删除。

多点定位：找出不说自己在哪里的飞机

并不是每架飞机都广播位置。较老的应答机回答雷达时只给身份和高度，没有卫星输入；有些飞机故意什么也不发。然而它们在 1090 MHz 上的发射依然会到达地面，一个网络可以把卫星导航反过来用，给它们定位。如果四台时钟精确同步的接收机各自记录下同一次发射到达的时刻，这些时刻之间的差就揭示了距离之差：一条比到达接收机 B 早一微秒到达接收机 A 的消息，其发出点离 A 比离 B 近 300 m。所有具有这一性质的点都位于 A 和 B 之间的一个曲面上，即一个双曲面。来自四台接收机的三个这样的曲面，相交于飞机所在之处。这就是**多点定位**，它要求相隔数百公里的接收机之间的计时精度达到约十分之一微秒，即 30 m，而接收机正是从飞机所用的同一批卫星那里获得这种计时的。

同一个思路，用了两次

卫星导航：一台接收机，四台位置已知的发射机，解出接收机的位置。多点定位：一台发射机，四台位置已知的接收机，解出发射机的位置。两者真正测量的都是时间，而 1 微秒就是 300 米。

第 11 章

它有什么用，又在哪里力有不逮

空中交通管制是第一个用户。如今在整个欧洲，管制员看到的是一幅融合的图景，其中每秒更新两次、具备卫星级精度的 ADS-B 与雷达和多点定位结合在一起；在雷达从未到达的地方，北大西洋、北极、撒哈拉和大多数海洋上空，ADS-B 消息由低轨道通信卫星上搭载的接收机捕获，这使得横越大西洋的飞机能以比从前紧密得多的间隔飞行。飞机是第二个用户：装有“ADS-B In”的客机向机组显示附近的交通，并把它送入防撞系统。机场在雾中用它跟踪地面上的飞机和车辆。研究人员用这些开放数据研究噪声、燃油消耗、凝结尾迹和延误。而学校屋顶上的一台接收机，也以微小的方式参与着这一切。

这个系统的弱点直接来自它的设计，每一个都值得理解，而不只是罗列。由于消息是明文广播的，既不加密也不签名，消息本身没有任何东西能证明它来自一架飞机。地面上的一台发射机可以非法地广播一条格式完美、描述一架根本不存在的飞机的消息，接收机会毫无怨言地把它解码出来。保护系统的不是消息，而是围绕着它的上下文：一个幽灵不会出现在雷达上，不会被多点定位找到，也不会像真实的交通那样行动，而管制中心在持续地交叉核对。带密码学签名的协议版本已经讨论了许多年；障碍与其说是技术上的，不如说是实际上的，因为全世界每一台应答机都得更换。

由于位置依赖于飞机的卫星接收机，任何干扰卫星导航的东西都会干扰 ADS-B。在冲突地区附近，对卫星信号的压制和欺骗已经变得常见，一架飞经这类区域的飞机可能算不出位置，或者算出一个错误的位置。它的消息随之带上降级的完好性等级，管制员的系统把它们标记出来，然后由雷达接手——这项独立测量从来就不是 ADS-B 要完全取代的。因此两者之间不是继任者与前任的关系，而是弱点互补的伙伴关系。

由于强制要求覆盖的是客机和大多数较大的飞机，而不是所有会飞的东西，这张地图从设计上就是不完整的。管制空域之外的轻型飞机、滑翔机、气球和许多军用飞机可能根本不装 ADS-B，一些轻型飞机使用 1090 MHz 接收机听不到的其他系统。又由于广播标识的是飞机，它也能标识飞机的主人：跟踪某一架特定的私人喷气机，实际上就是跟踪某一个特定的人，这催生了应主人要求隐去飞机注册号的计划，也引发了一场持续的争论：一架飞机向全世界广播的信息，是否也可以是私密的。这是一个很适合抛给年龄较大的学生的问题，因为物理学对它给不出答案。

第 12 章

简史

1935 至 1945 年

一次雷达在英国、德国和美国发展起来；到战争结束时，“敌我识别”应答机已能用编码应答回答雷达脉冲，这是二次雷达的前身。

20 世纪 50 至 60 年代

民用二次雷达标准化：1030 MHz 询问，1090 MHz 应答，Mode A 识别码和 Mode C 高度。

20 世纪 80 年代

带有唯一 24 位地址和数据消息的 Mode S 在麻省理工学院林肯实验室研制成功，并被 ICAO 采纳。GPS 开始面向民用用户运行。

20 世纪 90 年代至 21 世纪初

ADS-B 被定义并试验，尤其是在阿拉斯加，那里无法实现雷达覆盖，事故频发。1090 MHz 扩展电文完成国际标准化。

2010 年代

廉价的软件定义无线电让接收成为一种爱好；由数千台接收机组成的志愿者网络出现。接收机被送上卫星，用于海洋覆盖。

2020 年

ADS-B 在美国（1 月）和欧盟（6 月，过渡期至年底）成为管制空域内大多数飞机的强制装备。天空开始说话，无处不在，无时不在。

术语表

ADS-B

广播式自动相关监视（Automatic Dependent Surveillance - Broadcast）。飞机广播自己的位置。

气压高度

按标准大气由气压推算出的高度；飞机报告的就是它。

CPR

紧凑位置报告，用奇偶两套网格把一个精确位置装进 34 位的方案。

CRC

循环冗余校验，每条消息结尾的 24 位差错校验。

扩展电文

携带 ADS-B 的 112 位 Mode S 主动发射（extended squitter）。

GNSS

全球导航卫星系统：GPS、Galileo、GLONASS、BeiDou（北斗）。

ICAO 地址

飞机应答机的永久 24 位身份。

Mode S

ADS-B 赖以建立的选择性二次雷达标准。

多点定位

根据信号到达多台接收机的时间差为发射机定位。

路径损耗

信号随距离的减弱，遵循平方反比定律。

无线电地平线

天线与飞机之间的直线刚好不被地球遮挡的最远距离。

SDR

软件定义无线电：把原始信号样本交给计算机解码的调谐器。

SSR

二次监视雷达：地面询问，应答机应答。

应答机

回答雷达并在 1090 MHz 上发射 ADS-B 的机载无线电设备。

波长

相邻两个波峰之间的距离： c / f ，在 1090 MHz 时为 27.5 cm。

下一步

从理论到实践：搭建接收机

十二章讲解了一个你现在可以握在手里的系统。动手工作坊把它们变成一个下午的工作：花 100 到 150 欧元买什么、怎样制作和安放天线、怎样准备一块 Raspberry Pi 并安装 Dataero 共享程序，以及怎样看着你听到的飞机出现在实时地图上，并注明来自你的站点。上面的每一章都有一项测量在那里等着它：用真实的飞机检验无线电地平线，在信号一栏里看到平方反比定律，还有天空一天的节奏。

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