

物理与计算机 - 12 到 18 岁

解码天空

下面这行十六进制是一条真实的消息，由一架真实的飞机大约每秒两次发出。在 112 微秒内，它宣布了这架飞机是谁，并在配套的消息里宣布它在哪里、多高、多快。这门课程把理解它所需的一切走一遍：它所乘的波的物理、给飞机定位的计时、把它装进 112 位的编码、限制它能被听多远的几何，以及你可以自己搭建来亲耳听到它的接收机。

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

目录

一页看懂 ADS-B

第 1 课 波：作为看不见的光的无线电

第 2 课 计时与定位：飞机如何知道自己在哪里

第 3 课 消息：112 位，以及错误如何被捕捉

第 4 课 作用距离：地球的弧面与平方反比定律

第 5 课 天线与接收机：从一道 27 厘米的波到地图上的一个点

挑战题

下一步 把它做出来

一页看懂 ADS-B

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

一条扩展电文，按接收机记录的样子：28 个十六进制数字，112 位。到第 3 课，你将能读懂它的每一个字段。

空中交通管制必须持续地知道每一架飞机在哪里，才能让它们彼此分开：巡航中的客机每秒前进 250 m，而间隔规则要求雷达管制下的飞机之间垂直相隔 300 m 或水平相隔 9 km。七十年来，得知位置的办法是雷达：地面站发出一个脉冲并给回波计时，或者，在改进的二次雷达形式中，询问飞机上的应答机，应答机在 1090 MHz 上以身份和高度作答。雷达有局限：它需要巨大的功率，每转一圈只能看到每架飞机一次，而且覆盖不了海洋和山脉。

ADS-B，广播式自动相关监视（Automatic Dependent Surveillance - Broadcast），把问题反了过来。每架现代飞机都带有卫星导航接收机，因此知道自己的位置，精确到几米。ADS-B 干脆让飞机的应答机把这个位置连同身份、高度和速度一起，大约每秒两次，在 1090 MHz 上，不针对任何人地宣布出来。自动，因为没有任何东西触发它；相关，因为信息完全来自飞机自身的仪表；监视，因为它的目的是知道飞机在哪里；广播，因为它以明文发给任何在听的人。自 2020 年起，它在欧洲和美国空域中对大多数飞机是强制性的。管制员把它和雷达一起使用，其他飞机用它来互相看见，而学校屋顶上一台 25 欧元的 USB 接收机听到的是一模一样的消息。

要理解这个系统，你必须理解五件事，每一件就是一节课：承载消息的电磁波；给飞机定位的计时，以及让网络能找到一架不肯说自己在哪里的飞机的计时；数字消息及其错误如何被捕捉；限制它能被听多远的几何与能量；以及把它变回数据的天线和接收机。完整的叙述在参考课程里；第 3 课之前请读它的第 3 章和第 5 章，第 4、5 课之前读第 6 到 8 章。

第 1 课

波：作为看不见的光的无线电

消息以电磁波的形式离开飞机：振荡的电场和磁场在没有介质的空间中传播，速度为光速 $c = 3.00 \times 10^8$ m/s。可见光是同一现象在更高频率上的表现；你的眼睛响应大约 4 到 8×10^{14} Hz，而 ADS-B 以 1.09×10^9 Hz 发射，低五十万倍。飞机的消息和这块屏幕发出的光在种类上没有区别，只在频率上不同。

由于波以固定速度传播，它的频率决定了它的波长。一秒钟内波前进 c 米并完成 f 个周期，所以每个周期占据 c / f 米： $c = f \times \lambda$ 。对 ADS-B， $\lambda = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275$ m。在飞机和你的天线之间穿行的波，波峰相距 27.5 cm，在波谱上位于手机信号（17 cm）和调频电台（3 m）之间。自己画出这个波谱，用从 10^6 Hz 到 10^{18} Hz 的对数坐标轴，把调频广播、ADS-B、手机、Wi-Fi、红外线、可见光和 X 射线放上去。飞机的波就坐在你口袋里那些东西中间。

$$c = f \times \lambda$$

$$\text{即 } 3.00 \times 10^8 \text{ m/s} = 1.09 \times 10^9 \text{ Hz} \times 0.275 \text{ m}$$

无线电波不是什么？不是声音。声音是介质中的压力波，在空气中以 343 m/s 传播，在水中 1500 m/s，在真空中根本不传播。无线电是光：它不需要介质，这就是它能穿过从卫星到飞机的真空的原因，而且它快 $3.00 \times 10^8 / 343$ 倍，约 875000 倍。如果 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 微秒后到达；声音 87 秒后才到，那时飞机已经飞了 22 km。绳波与光共有那些要紧的性质，波长、频率和固定的速度，所以抖得更快意味着波更短而不是更快；它的不同在于需要绳子。

波的一个性质在第 5 课会很要紧：它的极化。电场在与传播方向垂直的某个确定方向上振荡。飞机的天线是竖直的，所以 ADS-B 波是垂直极化的，而一根侧放的接收天线几乎截获不到它，正如竖直抖动的绳波会被水平的缝挡住。现在就预测一下，如果天线是水平的，你的接收机的作用距离会怎样；你将在项目中检验它。

第 2 课

计时与定位：飞机如何知道自己在哪里

每条 ADS-B 消息里的位置都来自卫星导航，而卫星导航是一种对时间的测量。每个系统（GPS、Galileo、GLONASS、BeiDou）约有三十颗卫星，在约 20200 km 的轨道上运行，每颗带一台原子钟，每颗发射一个声明自身位置和精确发射瞬间的信号。飞机上的接收机记下到达瞬间。两者之差乘以 c ，就是到那颗卫星的距离；从正头顶，信号要走 $20200 / 300000 = 0.0673$ s。一个距离把接收机放在以那颗卫星为中心的球面上；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，舍去。如果接收机有一台完美的时钟，三颗卫星就够了。它只有一块漂移达微秒的石英晶体，而一微秒就是 300 m 的距离。所以接收机把自己的时钟误差当作第四个未知数，使用第四颗卫星：四个方程，四个未知数（ x 、 y 、 z 和时钟偏移），连续求解。作为副产品，每台卫星接收机都能把时间保持在几十纳秒以内，本课的后半部分正依赖于此。

牢记数量级：光每纳秒走 0.3 m，每微秒走 300 m。精确到 3 m 的位置意味着精确到 10 ns 的计时。一颗时钟快了 1 微秒的卫星，会把每一台使用它的接收机沿着朝向它的方向推开 300 m，这就是为什么卫星时钟每天要从地面校正好几次。

飞机带有两种高度。卫星解给出的是相对于参考椭球的几何高度。但它为空中交通目的广播的高度是气压高度：机身上一个静压孔处的气压，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 摄氏度，每公里递减 6.5 度。当实际气压偏离标准时，每架飞机的气压高度都偏差同样的量，而这恰恰是间隔所需要的：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。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。如果你有电子表格，把 $p = p_0 (1 - 0.0065 \text{ h} / 288.15)^{5.255}$ 反解，验证在 11000 m 处气压约为 227 hPa，不到海平面的四分之一：客机穿行的那种空气不足以让你保持清醒。

现在把整个思路反过来。有些飞机在 1090 MHz 上发射却没有位置：老式应答机回答雷达时只给身份和高度，或者飞机的卫星接收被干扰。一个接收机网络仍然可以通过多点定位找到它们。假设四台时钟同步的接收机各自记录下同一次发射的到达时间。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，所有这样的点构成一个以 A 和 B 为焦点的双曲面。四台接收机的三对独立组合给出三个双曲面，它们相交于飞机。这是已知与未知互换了的卫星问题：那边是一台接收机和四台已知的发射机；这边是一台发射机和四台已知的接收机。两者测量的都是时间，而 1 微秒就是 300 m。接收机从飞机所用的同一批卫星把时钟同步到约 100 ns。

你可以用声音来做这件事。三个人拿着秒表站在运动场上测定好的位置；第四个人藏起来拍一次手；每个人记录延迟。声速 343 m/s，0.1 s 的差就是 34 m，用比例图试探位置，或者画出双曲线的草图，就能找到拍手的人。然后问问，要用无线电在 200 km 上做同样的事，秒表得有多精确，你就会明白为什么这个网络需要原子时。

第 3 课

消息：112 位，以及错误如何被捕捉

应答机以 Mode S 扩展电文的形式发送 ADS-B：一个 8 微秒的前导码，然后是 112 个数据位，每微秒一位。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，它的任务是回答一个你可能没想到要问的问题：在一条满是噪声和其他飞机的信道里，接收机怎么知道一条消息开始了，每个比特又从何时开始？解码器持续地盯着这个图样，一旦看到，两件事它都知道了。你用的每一种数字协议，从 Wi-Fi 到二维码，都有对应的东西。

发射机只能开或关；它怎么发送 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、后半静默是 1；先静默、后有脉冲是 0。每个比特总是恰好一个脉冲。想一想为什么这比“有脉冲是 1、没脉冲是 0”更好。接收机从不丢失计时，哪怕遇到一长串 0，而在朴素方案里，一长串 0 与静默无法区分。而且它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固定电平，所以来自 400 km 外的弱信号和来自头顶的强信号解码得一样可靠。

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 位的布局如下，你应当能凭记忆复述。第 1 到 5 位：下行格式，来自应答机的 ADS-B 为 17。第 6 到 8 位：能力码。第 9 到 32 位：24 位的 ICAO 地址，飞机的永久身份，在注册时分配；共有 $2^{24} = 16777216$ 个，成块分配给各国，比利时的是十六进制 448000 到 44FFFF。第 33 到 88 位：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。类型码 1 到 4 以八个 6 位字符携带呼号，每个字符 64 种符号。类型码 9 到 18 携带空中位置：12 位以 25 英尺为步长的气压高度、一个奇偶标志，以及各 17 位的编码纬度和经度。类型码 19 以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携带速度。第 89 到 112 位：24 位的校验。核对算术：12 位高度以 25 ft 计覆盖 102400 ft；17 位若在 180 度

纬度上朴素地使用，分辨率只有 1.4 km。位置之所以比这好，是因为紧凑位置报告：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。各听到一条的接收机能毫不含糊地确定区域，然后用单条消息跟踪。用时间换来同样比特下更高的精度。

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)

解剖本页开头那条真实的消息。8D4840D6202CC371C32CE0576098 是 28 个十六进制数字，112 位。前两位 8D 的二进制是 1000 1101；前五位 10001 是 17，所以这是来自应答机的 ADS-B，接下来三位 101 给出能力 5。接下来六位 4840D6 是 ICAO 地址，分配表把它归于荷兰。下一对数字 20 以 00100 开头，类型码 4，一条识别消息，解码随后的 6 位字符得到呼号 KLM1023。最后六位 576098 是校验。用电子表格或几行代码，你可以完成整个解码，而看着一行十六进制就能说出“一架 KLM 的飞机在宣布 1023 航班”，正是这一课的目标。

校验最值得思考。在繁忙机场上空，不同飞机的发射在接收机上不断重叠，单个脉冲会被噪声吞掉；解码器有时不可避免地会拼出错误的位。最后 24 位是循环冗余校验：88 个消息位被当作一个长二进制数，用一种减法即异或的算术，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。任何一个翻转的位、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，消息便被拒收。先手算一个 8 位消息的 4 位 CRC 来看清机制，然后，如果你会编程，实现真正的 CRC-24，验证示例消息通过、而翻转任何一位都会使它失败。这是每一个现代系统都在用的差错检测，而在这个语境里，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。

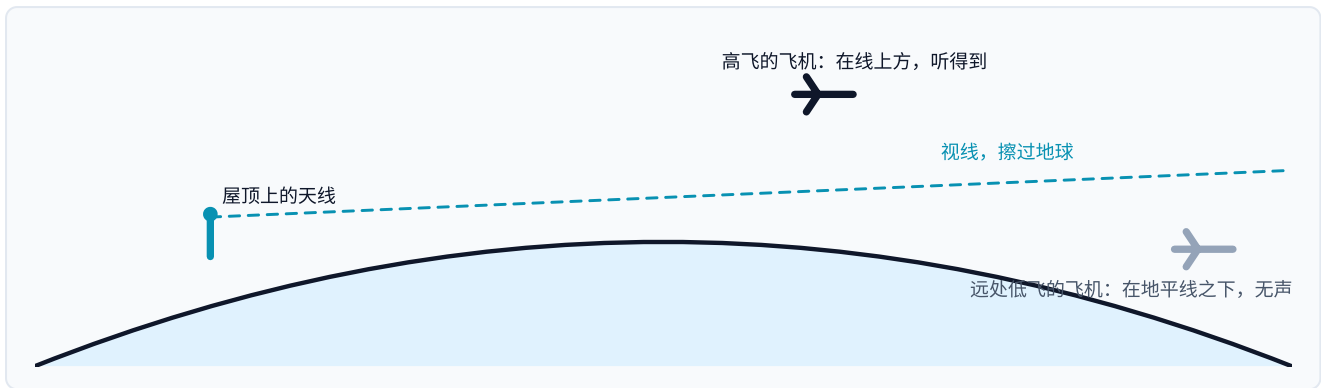
第 4 课

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？有两种不同的极限在起作用，值得把它们分开看。第一种是几何的。在 1090 MHz，无线电不会绕着地球弯曲；它沿直线传播，所以接收机只能听到其地平线之上的飞机，即从飞机到天线的直线不碰到地面的那些。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；切线和两条半径在切点处构成直角，所以 $d^2 + R^2 = (R + h)^2$ ，得 $d^2 = 2Rh + h^2$ ，由于 h 相对于 R 可以忽略， $d = \sqrt{2Rh}$ 。取 $R = 6371$ km， h 以米计， d (km) = $3.57 \sqrt{h}$ 。大气的折射率随高度下降，使无线电略微向下弯曲；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： $4.12 \times (4.47 + 104.9) = 451$ km。同一天线，飞机在 1000 m：149 km。30 km 外跑道上的飞机： $4.12 \times (4.47 + 2) = 27$ km，所以无声。



用你自己的天线高度画出 d 随 h^2 变化的图。曲线先陡后平，它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，对进近中的飞机是几十公里，对地面上的飞机一无所获，除非是隔壁的机场。它解释了为什么高度是接收机最重要的性质，以及为什么一座山、一栋楼，或者飞机侧倾转离时自己的机翼，会瞬间切断航迹。

第二种极限是能量。应答机辐射几百瓦，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，你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。工程师用分贝表示损耗，10 dB 是功率的十倍，3 dB 是两倍，因为分贝把跨越许多数量级的乘法变成了加法。两根简单天线之间的自由空间路径损耗是：

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

在 400 km 和 1090 MHz: $52.0 + 60.7 + 32.4 = 145$ dB。250 W 的发射机是 +54 dBm；接收功率 $54 - 145 = -91$ dBm，约 8×10^{-13} W。

这个数字值得停下来想一想：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，一万亿分之一瓦。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 9 dB 的余量。换句话说，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，而这是有意设计的：应答机功率和接收机标准的规定，就是要让一架飞机在其地平线之内可闻、而超出不多，以免信道被邻国的交通淹没。

两个细化。多普勒：以 250 m/s 接近的飞机使接收频率偏移 $f v / c = 1.09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908$ Hz，不到百万分之一，接收机从不在意；对比同一架飞机的声音，那里 v / c 是 $250 / 343$ ，飞机经过时音高下降将近一个八度。还有飞行时间：400 km 以 c 计是 1.33 ms，所以广播的位置到达时已经旧了 1.33 ms，其间飞机移动了 33 cm；对地图可以忽略，对多点定位则是决定性的，它正是靠这些微秒活着的。

第 5 课

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，而同一个装置在电流驱动下会发射出一道波；接收天线和发射天线是同样东西反过来运行。感应电流在共振时最大，此时导体的长度让沿导体的电流分布与波的振荡相吻合，正如长度合适的琴弦与特定的音共振。直导体的基频共振在半个波长处，1090 MHz 时为 13.75 cm，电流在中央最大、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；买来的 1090 MHz 天线把同样的几何结构藏在它的管子里，并层层叠加了好几次。自制天线只要差几毫米就会失谐，只能听到一小部分天空，所以项目的接收机使用出厂调谐的天线。

竖直单极天线对地平线方向最灵敏，沿自身轴线方向则完全不灵敏；它在三维空间中的灵敏度是一个环形甜甜圈，天线穿过中间的洞。所以你的接收机会完美地听到 300 km 外的飞机，却会把正从头顶经过的那一架丢失几秒钟，而你可以亲眼看着这件事发生。共线天线，即多个谐振单元叠放，把甜甜圈压扁，以头顶的空洞为代价提高地平线方向的灵敏度：这就是天线增益，以 dBi 计量，它来自灵敏度的重新分配，绝不是凭空创造。另外，根据第 1 课，天线必须竖直，因为波是垂直极化的。

天线和地图上的一个点之间有四个阶段。带通滤波器让 1090 MHz 通过，拒绝几百兆赫之外强得多的手机信号，否则它们会使后面的一切饱和。天线处的低噪声放大器在电缆之前把信号放大一千倍，而电缆在 1090 MHz 上每十米损耗约 3 dB，即一半信号；在电缆之后放大，就连电缆的噪声也一起放大了。软件定义无线电，一个原本作为电视调谐器出售的 20 欧元 USB 设备，把信号下变频，并以每秒两百万次采样成一串数字。从这里起就是编程了：免费软件在样本中扫描前导码，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、速度和身份，并保持每架飞机的状态直到消息停止到达，通常是因为它降到了地平线以下。

画出这条链条，标出每个阶段的量：天线处的纳伏，放大器之后的微伏，无线电输出的每秒两百万个样本，解码器输出的每秒几百帧，跟踪器输出的每架飞机一条记录。地图上的一个点是一条链条的远端，其中每一环都是这门课程里的一个概念：共振、滤波、放大、采样、模式匹配、解码、差错校验、汇聚。项目就是搭建这条链条，并用天空检验课程：测量你的最大距离随高度的变化，与地平线公式比较；比较天线在室内、窗边和屋顶上，竖直和水平的表现；记录一天的交通，找出最繁忙的小时和典型的巡航高度；解码原始消息，并在自己的代码中验证它们的 CRC。然后，问一问这个系统提出却不回答的问题：消息没有签名，那么是什么阻止有人广播一架幽灵飞机；飞机依赖可能被干扰的卫星，那么被干扰时管制员看到的是什么；数据标识飞机，而飞机可以标识人，那么谁应当有权跟踪谁。

挑战题

每一题先在纸上算出来。核对会显示答案和推理。

1. 1. 1090 MHz 信号的波长是多少？为它制作的四分之一波长天线有多长？

2. 2. 消息比声音快多少倍？30 km 外的一架飞机同时发出两者；声音到达时它飞了多远？

3. 3. 接收机的时钟误差为 2 微秒。这会造成多大的距离误差？卫星接收机为什么需要四颗卫星而不是三颗？

4. 4. 24 位地址能标识多少架飞机？以每微秒 1 位计，一条 112 位消息持续多久？加上前导码的整次发射呢？

5. 5. 在消息 8D4840D6... 中，下行格式和能力是什么？ICAO 地址是什么？

6. 6. 接收天线高 15 m。到 9000 m 高的飞机的无线电地平线是多少？到 300 m 高的呢？

7. 7. 为什么距离加倍会使接收功率变为四分之一？200 km 处的路径损耗是多少，与 400 km 处的 145 dB 相比如何？

8. 8. 预测：如果天线平放，作用距离会怎样？如果接收机从屋顶搬到底层呢？

下一步

把它做出来

这几节课里的一切都可以从一扇窗口得到验证。动手工作坊给你购物清单（约 100 到 150 欧元，或者你已有一块 Raspberry Pi）、该选哪根天线以及把它放在哪里、安装 Dataero 共享程序的三条命令，以及用真实飞机检验公式的测量：无线电地平线、平方反比定律、一天的节奏。当你的接收机向地图共享数据时，它听到的每一架飞机都会为所有人画出来，上面带着你的站点的名字。

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

答案

1. 1. 1090 MHz 信号的波长是多少？为它制作的四分之一波长天线有多长？
 $\lambda = c / f = 3.00 \times 10^8 / 1.09 \times 10^9 = 0.275 \text{ m}$ 。四分之一波长振子为 6.9 cm。固定的光速迫使频率与波长成反比。
2. 2. 消息比声音快多少倍？30 km 外的一架飞机同时发出两者；声音到达时它飞了多远？
 $3.00 \times 10^8 / 343 = \text{约 } 875000 \text{ 倍}$ 。消息 100 微秒到达，声音 87 s 到达，其间以 250 m/s 飞行的飞机飞了 22 km。
3. 3. 接收机的时钟误差为 2 微秒。这会造成多大的距离误差？卫星接收机为什么需要四颗卫星而不是三颗？
 $2 \times 10^{-6} \text{ s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 600 \text{ m}$ 。只有在时钟完美时，三颗卫星才能确定 x、y、z；时钟偏移是第四个未知数，所以需要第四颗卫星。
4. 4. 24 位地址能标识多少架飞机？以每微秒 1 位计，一条 112 位消息持续多久？加上前导码的整次发射呢？
 $2^{24} = 16777216$ 。数据持续 112 微秒；加上 8 微秒的前导码，为 120 微秒。
5. 5. 在消息 8D4840D6... 中，下行格式和能力是什么？ICAO 地址是什么？
8D = 1000 1101。前五位 10001 = 17：DF 17，来自 Mode S 应答机的 ADS-B。接下来三位 101 = 5：CA 5。ICAO 地址是 4840D6，分配给荷兰。
6. 6. 接收天线高 15 m。到 9000 m 高的飞机的无线电地平线是多少？到 300 m 高的呢？
 $d = 4.12 \times (\sqrt{15} + \sqrt{9000}) = 4.12 \times (3.87 + 94.9) = 407 \text{ km}$ 。对 300 m： $4.12 \times (3.87 + 17.3) = 87 \text{ km}$ 。
7. 7. 为什么距离加倍会使接收功率变为四分之一？200 km 处的路径损耗是多少，与 400 km 处的 145 dB 相比如何？
发射功率散布在面积为 $4 \pi d^2$ 的球面上，距离加倍时面积为四倍。在 200 km： $20 \log_{10}(200) + 20 \log_{10}(1090) + 32.44 = 46.0 + 60.7 + 32.4 = 139 \text{ dB}$ ，比 400 km 处少 6 dB（四倍）。
8. 8. 预测：如果天线平放，作用距离会怎样？如果接收机从屋顶搬到底层呢？
平放：天线与垂直极化的波交叉极化；感应电流取决于电场沿导体方向的分量，所以它几乎听不到什么。底层：地平线项 $4.12 \sqrt{h_1}$ 缩小，建筑物挡住视线，所以作用距离急剧下降，对低飞的飞机尤其如此。