參考課程：給所有成人

ADS-B 是什麼、如何運作

共十二章。不需要任何航空或無線電的先備知識；完整例題只需中學數學程度，即使略過也不會失去主線。閱讀時間約 50 分鐘。

學習 - https://radar.dataero.eu/zh-hant/learning/course　2026-11-21

目錄

第 1 章 問題所在：滿天飛機，卻沒有人看得見
第 2 章 在 ADS-B 之前：用雷達尋找飛機
第 3 章 構想：讓飛機自己告訴我們
第 4 章 飛機如何知道自己在哪裡
第 5 章 訊息的結構
第 6 章：物理 電波：無線電是看不見的光
第 7 章：物理 範圍：地球的曲率與訊號的衰減
第 8 章：物理 天線：捕捉 27 公分的電波
第 9 章 接收與解碼
第 10 章 從一個接收器到整個大陸的地圖
第 11 章 它的用途，以及它的不足之處
第 12 章 簡史
名詞解釋
下一步 從理論到實作：動手做接收器

第 1 章

問題所在：滿天飛機，卻沒有人看得見

在平常的工作日，大約有 30,000 個航班穿越歐洲空域。巡航中的客機速度約為每秒 250 公尺，也就是時速 900 公里；兩架迎面而來的飛機，每秒會拉近半公里。從窗戶往外看的飛行員幾乎什麼都看不到：在 10,000 公尺高空，其他飛機只是小點，而且大部分還被雲層遮住。天空是一個沒有畫上道路的立體路網，上面的交通既快速又看不見。

航空交通管制的存在，就是為了讓這些交通彼此保持距離。原則上規則很簡單：在管制空域中，飛機之間要保持至少 1,000 英尺（約 300 公尺）的垂直間隔，或一定的水平間隔，在雷達涵蓋範圍內通常是 5 浬（9.3 公里），在海洋上空則大得多。要執行這些規則，管制員必須持續且可靠地知道扇區內每一架飛機的位置：不是一分鐘前在哪裡，而是現在在哪裡、飛多高、往哪個方向。本課程的整個主題，就是這些資訊是如何取得的。它的專業術語叫做**監視**（surveillance）。

一個值得記住的數字
以時速 900 公里飛行，飛機一分鐘前進 15 公里，一秒前進 250 公尺。任何更新緩慢或誤差很大的監視方法，都會讓管制員在最關鍵的距離上只能猜測。

第 2 章

在 ADS-B 之前：用雷達尋找飛機

第一個答案是**初級雷達**，於 1930 年代末期開發，並在第二次世界大戰期間成熟。一具大型旋轉天線發出一個短暫而極強的無線電能量脈衝。當脈衝打到飛機時，其中極小的一部分會被反射回來。雷達測量脈衝發出到回波返回之間的時間；由於無線電以光速每秒 300,000 公里傳播，這段時間就代表距離。天線當時指向的方向則代表方位。初級雷達的優點是完全獨立：飛機不需要任何設備，這也是軍方至今仍在使用它的原

因。但它有明顯的弱點。遠方飛機的回波極其微弱，因此發射機必須非常龐大。回波無法告訴我們這架飛機是誰、飛多高。而且天線轉一圈需要好幾秒，因此每架飛機每 4 到 12 秒才被看到一次，而在這段時間裡它可能已經移動了 3 公里。

第二個答案是**次級監視雷達**（SSR），它讓飛機成為參與者。地面站在 1030 MHz 上發出一個問題，稱為*詢問*（interrogation）。機上一具小型無線電，也就是**詢答機**（transponder），聽到問題後，以自己強大的訊號在 1090 MHz 上回答。由於回覆是主動發射而不是被反射的，它比雷達回波強上數百萬倍；又因為它由電腦產生，所以可以攜帶資訊。在最早的形式（Mode A）中，回覆包含一個由管制員指派的四位數識別碼；在 Mode C 中還包含飛機的高度。1980 年代出現了 **Mode S**（「S」代表 selective，選擇式），每具詢答機都有一個獨一無二的 24 位元位址，可以被個別詢問，並能以 56 或 112 位元的資料訊息回答。請記住這個數字 1090 MHz 和這個名稱 Mode S：ADS-B 就是直接建立在這兩者之上。

次級雷達是一大進步，但它仍與前身共有兩個限制。飛機只有在被詢問時才會說話，所以地面仍然需要一個在範圍內的詢問站，這就排除了海洋、沙漠和山脈。而且站台仍需要旋轉天線才能知道回覆來自哪個方向，因此每架飛機每轉一圈仍只被看到一次，管制員的螢幕上顯示的仍是一個每隔幾秒跳一下的點，而不是一架平順移動的飛機。要做得更好，需要一種根本不同的方法：讓飛機不必被詢問就能回報位置，而地面完全不需要測量任何東西。

第 3 章

構想：讓飛機自己告訴我們

到了 1990 年代，兩項技術已經成熟，讓另一種做法成為可能。衛星導航讓每一架配備適當設備的飛機都能準確知道自己的位置，遠比任何雷達從地面測量的結果更好。而 Mode S 詢答機早已提供一具能在 1090 MHz 上發送資料訊息的無線電。把兩者結合起來，邏輯就無可抗拒：與其讓地面費力測量飛機在哪裡，不如讓早已知道答案的飛機，定期地向所有人直接說出來。這就是 ADS-B，而它名稱中的四個詞正是精確的描述。

它是**自動**（automatic）的：不需要任何事物觸發發射。詢答機按照自己的時程發送，大約每秒兩次，不論範圍內是否有地面站，也不論飛行員是否做了什麼；事實上，飛行員在飛行中除了關掉詢答機之外無法停止它，而關掉詢答機是被禁止的。它是**相關**（dependent）的：訊息中的每一項內容都來自飛機自己的設備，位置來自它的衛星接收器，高度來自它的氣壓高度表，地面什麼都不測量；它相信它被告知的內容。它是**監視**（surveillance）：它的目的是讓別人知道飛機在哪裡，供航空交通管制和附近的飛機使用，有別於導航（飛機自己知道自己在哪裡），也有別於通訊（與飛行員交談）。而它是一種**廣播**（broadcast）：訊息沒有收件人、沒有確認、也沒有加密，範圍內任何擁有接收器的人聽到的內容都完全相同，不論是管制中心、另一架客機，還是一所學校。

「相關」（dependent）是讓工程師擔心的詞，也是最值得解釋的詞。雷達進行的是獨立測量：如果飛機的儀器有誤，雷達並不受影響。ADS-B 則繼承了飛機自身導航系統的每一個誤差；如果該系統被欺騙或故障，廣播出去的位置就會帶著同樣的自信而出錯。這就是為什麼每則 ADS-B 訊息除了位置之外，還會說明飛機對自身位置的信任程度（也就是我們在第 5 章會遇到的完整性與精確度類別），也是雷達至今尚未關閉的原因。

「廣播」（broadcast）則是讓這門課成為可能的詞。由於訊息以明文發送給所有人，不只航空交通管制聽得到，任何調到 1090 MHz 的接收器都聽得到，包括您可能放在學校屋頂上的那一具。同樣的特性也是這個系統主要限制的來源，我們將在第 11 章討論：任何人都能讀的訊息，也是任何人都能偽造的訊息。

第 4 章

飛機如何知道自己在哪裡

ADS-B 的一切都建立在飛機知道自己位置的基礎上，所以這一章講的是衛星導航。通用名稱是 **GNSS**，全球導航衛星系統；美國的 GPS 最為人熟知，歐洲的 Galileo、俄羅斯的 GLONASS 和中國的北斗（BeiDou）都依據相同原理運作。每個系統都是一個由大約 24 至 30 顆衛星組成的星系，在約 20,000 公里的高度運行，遠高於飛機，每顆衛星都搭載一具精確到數十億分之一秒的原子鐘。每顆衛星持續發送一個無線電訊號，內容大致是：「這是第 N 號衛星，我的位置是某某，我發出這則訊息的時間正好是 T」。

飛機上的接收器會稍晚才聽到這個訊號，因為無線電傳播需要時間：以每秒 300,000 公里計算，從衛星到這裡的 20,000 公里大約需要千分之 67 秒。接收器把訊息中的時間戳記與抵達時間相比較。兩者的差乘以光速，就是到這顆衛星的距離。一個距離把接收器定位在以該衛星為中心的一個球面上。兩個球面相交成一個圓；三個球面相交成兩個點，其中一個通常不合理（深埋地底或遠在太空中）而被捨棄。所以，如果接收器擁有一具完美的時鐘，三顆衛星就夠了。

可惜它沒有。一具原子鐘要價數萬歐元，也裝不進去；接收器只有一具便宜的石英鐘，誤差可能遠大於所需的計時精度。精妙之處就在這裡。接收器把自己的時鐘誤差當作第四個未知數，與三個位置座標並列，然後再聆聽第四顆衛星。四個方程式、四個未知數：接收器解出自己的位置，並順帶把自己的時鐘校正到幾十奈秒以內。這就是為什麼衛星接收器至少需要看到四顆衛星，也是為什麼每一具 GNSS 接收器順帶也是建築物裡最準確的時鐘之一。

這些數量級值得細細體會，因為它們說明了衛星導航其實是一門計時的功夫，幾何只是附帶的。光在一奈秒內前進 30 公分，在一微秒內前進 300 公尺，所以百萬分之一秒的計時誤差就變成 300 公尺的位置誤差，而現代接收器數公尺的精度，相當於約十奈秒等級的計時。舉個具體例子。一顆衛星在訊號上標記時間 12:00:00.000 000 000；飛機的接收器在 12:00:00.070 000 000 聽到它。傳播時間為 0.070 秒，所以距離是 0.070 x 300,000 km/s = 21,000 公里。如果接收器自己的時鐘只快了一微秒，它就會算出 21,000.3 公里，遠了 300 公尺，而同樣的誤差也會混入其他每一顆衛星的距離中。這個共同的誤差，正是第四顆衛星所揭露並消除的。

兩種高度，而不是一種

衛星給出的是相對於地球數學表面的高度，也就是*幾何*高度。然而飛機為航空交通目的所廣播的高度並不是這一個，而是**氣壓高度**，它由機外的氣壓推算而來，透過機身上一個稱為靜壓孔的小開口測量。氣壓隨高度以已知的方式下降（在地面附近大約每 8 公尺下降 1 hPa，越高降得越慢），世界上每一具高度表都使用同一個標準大氣把氣壓換算成高度，以海平面 1013.25 hPa 為基準。在氣壓異常的日子裡，每架飛機的氣壓高度都會偏差同樣的量，而這正是重點所在：對隔離而言，重要的不是相對於海面的真實高度，而是兩架都顯示「飛航空層 350」的飛機，與一架顯示「飛航空層 340」的飛機之間真的相隔 300 公尺。ADS-B 在位置訊息中以 25 英尺（7.6 公尺）為單位廣播氣壓高度，並另外廣播它與衛星高度之間的差值，讓接收器可以同時還原兩者。

第 5 章

訊息的結構

全世界客機使用的 ADS-B 訊息，是一種稱為**延伸自發訊號**（extended squitter）的 Mode S 發射；「squitter」是舊時雷達的行話，指主動發送而非回覆的發射，而「extended」（延伸）是因為它長達 112 位元，是原本 Mode S 回覆的兩倍長。工程師把「1090 MHz extended squitter」寫成「1090ES」。每次發

射總共持續 120 微秒：先是 8 微秒的*前導碼*（preamble），由四個脈衝組成的固定圖樣，讓接收器能辨認訊息的開頭並同步時鐘，接著是 112 個資料位元，每微秒一個位元。

位元如何發送：脈衝位置調變

每個一微秒的位元時槽被分成兩半。前半有一個無線電能量脈衝、後半靜默，代表 1；先靜默再有脈衝，代表 0。因此不論資料是什麼，每個位元都正好有一個脈衝，接收器只需判斷每個時槽的哪一半比較強。這種方式稱為脈衝位置調變，它能抵抗訊號從詢答機傳到遠方天線途中所遭受的各種雜訊與衰落，而且解碼成本很低。

以脈衝位置調變表示四個位元：1、0、1、1



每個時槽為 1 微秒。脈衝在前半：1。脈衝在後半：0。

112 個位元



前五個位元是下行格式（downlink format），說明這是哪一種 Mode S 訊息；數值 17 代表「來自 Mode S 詢答機的 ADS-B」。24 位元的 **ICAO 位址**是飛機的永久身分，在註冊時指派：共有 2 的 24 次方，即 16,777,216 個可能的位址，由聯合國的民航機構 ICAO 分塊配發給各國。例如比利時的飛機，位址落在十六進位的 448000 到 44FFFF 之間。與舊式 Mode A 的四位數代碼不同，這個位址永遠不變、也從不共用，所以接收器從第一則訊息起就能確定自己聽到的是哪一架飛機。

56 位元的 **ME** 欄位是真正的內容，它的前五個位元是*類型碼*（type code），說明其餘部分的意義。類型碼 1 至 4 攜帶飛機的呼號，例如 BEL1234 或 RYR7KL，以八個六位元字元表示。類型碼 9 至 18 攜帶空中位置與氣壓高度；20 至 22 則是相同內容但使用衛星高度。類型碼 19 攜帶速度：分解成東西向與南北向分量的地速、垂直速率，以及氣壓高度與衛星高度的差值。類型碼 28、29 和 31 攜帶狀態：緊急代碼、選定高度，以及說明廣播位置可信程度的完整性與精確度類別（例如 NIC 為 8，代表以高機率保證真實位置距離回報位置不超過 185 公尺）。

最後 24 個位元是**循環冗餘檢查**（CRC），這是一個由前面 88 個位元經固定多項式除法算出的數字。接收器對它解碼出的位元重複這項計算；如果結果不符，就表示至少有一個位元在傳輸途中損壞，訊息會被捨棄。由於一微秒的脈衝很容易因雜訊或另一架飛機的重疊訊息而遺失，這項檢查正是讓錯亂的位置不會出現在管制員螢幕上的關鍵。一則真實的訊息，在接收器的紀錄中看起來像這樣：

> 8D **4840D6** 202CC371C32CE0 576098
>
> 8D：下行格式 17，能力 5。4840D6：ICAO 位址，一架荷蘭飛機。20...：類型碼 4，一則識別訊息，解碼後是呼號 KLM1023。576098：錯誤檢查。

把地球塞進 34 個位元

位置訊息中，緯度和經度各只有 17 個位元。這相當於繞地球一圈 131,072 個刻度，在赤道上每格約 300 公尺：遠遠不夠。ADS-B 用**緊湊位置回報**（compact position reporting）解決這個問題。地球被劃分成許多區域；17 個位元能在一個區域內給出非常精確的位置（約 5 公尺），但不知道是哪個區域。飛機交替使用兩套略有不同的區域網格，也就是「偶數」與「奇數」訊息，接收器只要各聽到一則，就能毫無歧義地算出所在區域。一旦算出，單一則訊息就足以追蹤這架飛機，因為它不太可能在半秒內跳到另一個區域。這是一個巧妙的技巧，在不增加位元的情況下讓有效精度加倍。

發送頻率

飛行中的詢答機每秒發送兩次位置訊息、每秒兩次速度訊息，每五秒發送一次呼號，再加上間隔較長的狀態訊息，總計每秒大約四到五則延伸自發訊號。每則持續 120 微秒；詢答機實際用來發送 ADS-B 的時間遠不到千分之一。這一秒的其餘時間，它都在聆聽並回覆 1030 MHz 上的雷達詢問，以及其他飛機防撞系統的查詢。

第 6 章：物理

電波：無線電是看不見的光

訊息以**無線電波**的形式離開飛機，而本課程中最有用的一個觀念是：無線電波和光線是同一種東西。兩者都是電磁波：電場和磁場一起振盪的圖樣，以光速 c 穿越空間，光速為每秒 299,792,458 公尺，大約就是每秒 300,000 公里。區分無線電波與綠光、醫院裡的 X 光或廚房微波爐裡的微波的，只有電磁場振盪的快慢：也就是**頻率** f，以赫茲（每秒振盪次數）為單位。

由於波以固定速度前進，頻率就決定了一個波峰到下一個波峰之間的距離，也就是**波長** lambda。一秒內，波前進 c 公尺並完成 f 次振盪，所以每次振盪佔 c / f 公尺：

$$c = f \times \lambda$$

以 ADS-B 為例：lambda = 300 000 000 / 1 090 000 000 = 0.275 m。飛機與您的天線之間的電波，波峰相距 27.5 公分，大約是一把學校用尺的長度。

電波	頻率	波長	備註
FM 廣播電台	100 MHz	3 m	汽車天線只有這個長度的幾分之一
ADS-B / Mode S	1 090 MHz	27.5 cm	雷達詢答機的回覆也使用這個頻率
行動電話（4G 頻段）	1 800 MHz	17 cm	頻譜上的近鄰
Wi-Fi、微波爐	2 450 MHz	12 cm	頻率相同，功率天差地遠
可見綠光	560 000 000 MHz	0.000 54 mm	頻率高出約五十萬倍

有兩個結果對後面的一切都很重要。第一，由於這種波就是光，除非有東西使它彎曲或阻擋它，否則它會沿直線前進，而且無法穿過地球。這決定了系統的範圍，也就是第 7 章的主題。第二，由於它的波長是 27.5 公分，與它作用最強的金屬結構，也就是天線，尺寸也在這個量級，這是第 8 章的主題。

為什麼無線電不是聲音

最常見的混淆，不論大人或小孩，就是把無線電和聲音搞混，這大概是因為「收音機」（radio）是一個會發出聲音的盒子。它們是毫不相干的現象。聲音是空氣中的壓力波，是分子一個推一個的連鎖反應；它需要介質才能傳播，速度為每秒 340 公尺，無法穿越真空。無線電什麼都不需要：它能穿越衛星與飛機之間的真空，而且速度快了將近一百萬倍。飛機的引擎聲和它的 ADS-B 訊息在同一刻離開飛機；訊息在 67 微秒內抵達 20 公里外的接收器，聲音則要整整一分鐘後才到。

為什麼是 1090 MHz

這個頻率是歷史遺產。1950 年代的國際協議把 960 至 1215 MHz 的頻段保留給航空無線電導航，而 1090 MHz 成為次級雷達詢答機的回覆頻率。設計 ADS-B 時，沿用每架客機上早已安裝的詢答機，遠比安裝一具新的無線電便宜，於是 ADS-B 就成了 Mode S 詢答機在 1090 MHz 上說的另一件事。在美國，飛行高度約 5,500 公尺以下的小型飛機可以改用第二套系統，也就是 978 MHz 上的 UAT，因此當地的接收器通常會同時收聽兩個頻率。

第 7 章：物理

範圍：地球的曲率與訊號的衰減

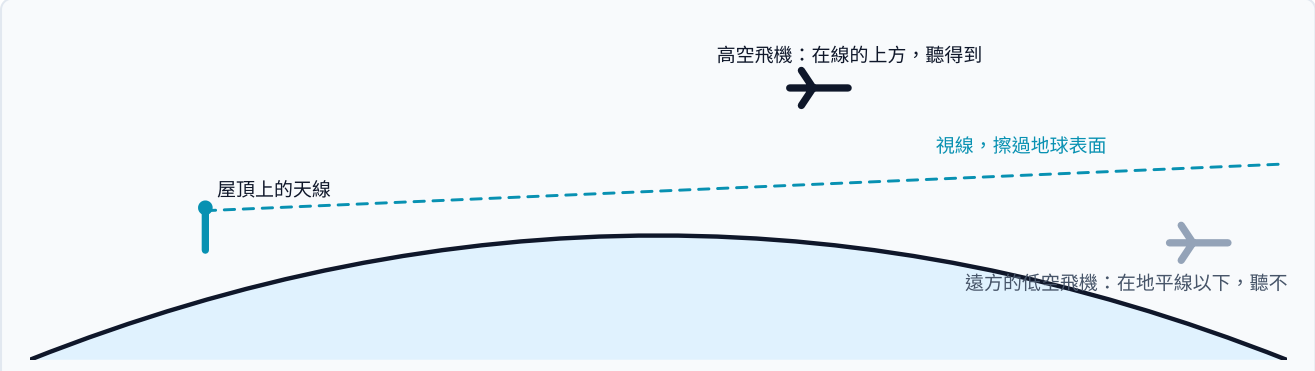
詢答機的峰值發射功率為數百瓦。這樣的訊號能在多遠的地方被聽到？限制它的是兩件截然不同的事，值得分開來看：幾何決定了一條硬邊界，功率則決定了一條軟邊界。

無線電地平線

在 1090 MHz，無線電的行為就像光：沿直線前進，不會沿著地球彎曲。因此，地面天線只有在它與飛機之間存在一條不穿過地面的直線時，才能聽到飛機。對地表的觀察者而言，地平線就是這條線剛好擦過地球的地方。飛機越高，這個擦過點就越遠；天線越高，又更遠一些。球面切線的幾何給出一個簡單的結果：以公里為單位的地平線距離，約為以公尺為單位的高度平方根的 3.57 倍。大氣會讓無線電略微向下彎曲，使地平線延伸約 15%，所以工程師改用 4.12：

```
d (km) = 4.12 x ( sqrt(h aircraft) + sqrt(h antenna) )   heights in metres
```

飛機在 11,000 公尺，天線在 20 公尺高的屋頂上：4.12 x (104.9 + 4.5) = 451 公里。飛機在 1,000 公尺，同樣的屋頂：4.12 x (31.6 + 4.5) = 149 公里。15 公里外地面上的飛機：完全聽不到，除非兩者之間的地面平坦且無遮蔽。



這解釋了接收器涵蓋範圍的典型形狀：對高空飛行的交通，是一個半徑 400 公里以上的圓；對進場中的飛機，縮小到幾十公里；對地面上的飛機則幾乎是零，除了隔壁的機場之外。這也解釋了為什麼接收器的高度遠比接收器的品質重要，以及為什麼一座山丘、一棟高樓，甚至飛機背向您傾斜轉彎時自己的機翼，都能瞬間切斷訊號。

平方反比定律

在地平線以內，訊號隨距離減弱。詢答機天線向所有水平方向輻射，所以它的功率分散在一個越來越大的球面上。球的表面積與半徑的平方成正比，因此落在固定大小天線上的功率，會隨距離的平方而減少：距離加倍，功率剩四分之一；距離十倍，剩百分之一。工程師以分貝表示這一點，稱為*路徑損耗*（path loss），在 1090 MHz、400 公里的距離下約為 145 dB，也就是說接收到的功率約比發射功率小 10 的 14.5 次方倍。一個 250 瓦的脈衝抵達時，大約只剩十億分之一毫瓦的十分之一。好的接收器剛好能偵測到，這就是為什麼幾何地平線和功率極限恰好都落在數百公里處：系統本來就是這樣設計的。

這兩個極限之間的交互作用值得理解。在地平線以內，來自附近飛機的強訊號和來自遠方飛機的弱訊號都能完美解碼，因為第 5 章的脈衝位置方式只問每個位元時槽的哪一半比較強，而不問有多強。訊號並不會隨著飛機遠去而逐漸變得無用；它一直可以解碼，直到在地平線附近的某處，不是被幾何切斷，就是終於被接收器中的雜訊淹沒，航跡就此中止。這就是為什麼涵蓋範圍圖有清楚的邊緣，也是為什麼接收器聽到的最遠的飛機，幾乎總是飛得最高的那些。

第 8 章：物理

天線：捕捉 27 公分的電波

天線是一段經過塑形的導體，讓經過的電磁波使其中的電子同步運動，產生一個微小的交流電，供接收器放大。發射機中則發生相反的過程：飛機天線中的交流電發出電波。這種能量交換的效率取決於導體相對於波長的大小。一根直導線在長度為半個波長時反應最強，也就是會*共振*（resonates），此時沿著導線來回擺盪的電流恰好配合電波的振盪，就像按照鞦韆的自然節奏去推它一樣。對 1090 MHz 而言，半個波長是 13.75 公分。

最常見的實用形式是**四分之一波長單極天線**：一根長度為四分之一波長、6.9 公分的垂直桿，立在一個導電表面上，也就是*接地平面*（ground plane）。接地平面的作用就像一面鏡子，所以這根桿子和它的鏡像合起來，表現就像一具半波長天線。這就是為什麼飛機上的 ADS-B 天線是機身上一片幾公分高的短小刀片（機身就是接地平面），也是為什麼業餘愛好者的天線是鐵罐蓋上的一小段導線。長度不對的導線仍然能用，但效果差得多：這隻「金屬耳朵」是經過調諧的。

天線還有三項由物理推導出的特性，每一項都有看得見的後果。第一是**極化**（polarisation）。電磁波的電場在與傳播方向垂直的某個固定方向上振盪，而天線只對沿著自身長度方向的電場分量起反應。飛機天線是垂直安裝的，所以 ADS-B 電波抵達時是垂直極化，接收天線也必須垂直；把它橫放，就幾乎什麼都聽不到，就像上下甩動的繩波會被一道水平的窄縫擋住一樣。第二是**輻射場型**（radiation pattern）。垂直天線朝地平線方向最靈敏，沿著自身軸線方向則完全不靈敏，因此它在三維空間中的靈敏度形狀像一個甜甜圈，天線穿過中間的洞。所以接收器經常毫不費力地聽到 300 公里外的飛機，卻會在一架飛機從正上方經過時失去它幾秒鐘，這一點在任何即時地圖上都值得留意。把幾個共振元件一個疊在另一個上面，可以把甜甜圈壓得更扁，把靈敏度集中到遠方飛機所在的地平線方向，代價是犧牲正上方；這就是天線**增益**（gain）的意思，而它永遠是靈敏度的重新分配，絕不是憑空創造。

第三項與天線和接收器之間的東西有關。天線不只接收 1090 MHz，也會接收附近的每一個訊號，包括頻率相差幾百 MHz、強度卻大得多的行動電話訊號，所以最前端要先放一個只讓航空頻段通過的濾波器。接著訊號要沿著電纜傳下去，而在 1090 MHz，同軸電纜每十公尺大約會損失一半的訊號；解決方法是在天線端、電纜之前放一個低雜訊放大器，讓訊號強到足以撐過這段旅程，而不是放在接收器端，因為在那裡放大，會把電纜的雜訊連同所剩無幾的訊號一起放大。這些都是細節，但正是這些細節決定了學校屋頂上的接收器能聽到地平線上的飛機，還是只能聽到附近的飛機。

第 9 章

接收與解碼

從天線到地圖上的一個點，中間是一條五個階段的鏈。天線把經過的電波轉成幾微伏特的交流電。濾波器和低雜訊放大器保留 1090 MHz 頻段、濾除其他一切，並把訊號放大一千倍。軟體定義無線電調到該頻率，以每秒兩百萬次的速度取樣訊號，把它轉成一串數字。解碼器在這串數字中搜尋前導碼圖樣，讀出 112 個位元，檢查同位並解碼各欄位。最後，追蹤器把來自每架飛機的訊息彙整成一筆持續更新的紀錄：一個位置、一條航跡、一個標籤。

最了不起的是第三個階段。直到 2010 年左右，解碼 1090 MHz 還需要價值數千歐元的專用硬體。後來業餘愛好者發現，一支 20 歐元的 USB 電視接收棒裡有一顆晶片，可以命令它調到任何頻率，並把原始訊號交給電腦。這種**軟體定義無線電**（SDR）把無線電問題變成了程式設計問題：一台筆記型電腦或 Raspberry Pi 每秒接收兩百萬個描述訊號強度的數字，再由免費軟體尋找前導碼圖樣、判斷每個微秒時槽的哪一半比較強、組合出 112 個位元、計算 CRC，然後列出各欄位。中學教材中的接收器專題正是這條鏈，學校花不到 100 歐元就能做出來。

追蹤器階段是訊息流變成知識的地方。別忘了，單一則位置訊息在配對到一則偶數訊息和一則奇數訊息之前是有歧義的。速度與位置分開到達，呼號又是另外到達，追蹤器依 ICAO 位址把它們拼接起來，捨棄所有未通過錯誤檢查的訊息，並保存每架飛機最後已知的狀態。如果一分鐘內都沒有收到訊息，通常是因為飛機已經降到地平線以下，這條航跡就會過期。

第 10 章

從一個接收器到整個大陸的地圖

一個接收器能聽到直徑數百公里的一圈天空。一張歐洲地圖需要數百個接收器，而有用的接收器並不在城市裡，而是分散各地：在海岸、在山谷、在島嶼上，在任何其他接收器的範圍到不了的地方。每個接收器把解碼後的訊息，各自附上抵達時間戳記，透過網際網路傳送到一個中央服務。這個服務負責*彙整*（aggregates）：來自高空飛機的同一則訊息，通常會同時從十到二十個接收器傳來，必須辨認出重複並加以合併。它也負責檢查：一個與所有鄰近接收器對同一架飛機的觀察都不一致的位置，很可能是解碼錯誤或詢答機故障，會被標記或捨棄。

多點定位：找出不說自己在哪裡的飛機

並不是每架飛機都會廣播位置。較舊的詢答機會以識別碼和高度回覆雷達，但沒有衛星輸入；有些飛機則刻意不發送位置。然而它們在 1090 MHz 上的發射仍然會傳到地面，而網路可以把衛星導航的原理反過來用，找出它們的位置。如果四個時鐘精確同步的接收器，各自記錄同一次發射抵達的時刻，這些時刻之間的差就揭露了距離的差：一則比接收器 B 早一微秒抵達接收器 A 的訊息，是從一個離 A 比離 B 近 300 公尺的點發出的。所有具備這個性質的點，都位於 A 與 B 之間的一個曲面，也就是雙曲面上。由四個接收器得出

的三個這樣的曲面，會相交於飛機所在處。這就是**多點定位**（multilateration），它要求相距數百公里的接收器之間，計時精度達到約十分之一微秒，也就是 30 公尺，而接收器正是從飛機所使用的同一批衛星取得這樣的計時。

> **同一個構想，用了兩次**
> 衛星導航：一個接收器、四個位置已知的發射源，解出接收器的位置。多點定位：一個發射源、四個位置已知的接收器，解出發射源的位置。兩者真正測量的都是時間，而 1 微秒就是 300 公尺。

第 11 章

它的用途，以及它的不足之處

航空交通管制是第一個使用者。在整個歐洲，管制員現在看到的是一幅融合的畫面，其中 ADS-B 以每秒兩次的更新和衛星等級的精度，與雷達及多點定位結合在一起；在雷達從未到達的地方，例如北大西洋、北極、撒哈拉和大部分海洋上空，ADS-B 訊息由低軌道通訊衛星上搭載的接收器接收，這讓橫越大西洋的飛機之間的間隔可以比以前小得多。飛機是第二個使用者：一架具備「ADS-B In」的客機會向機組員顯示附近的交通，並把它提供給防撞系統。機場用它在霧中追蹤地面上的飛機和車輛。研究人員利用這些公開資料研究噪音、燃油消耗、凝結尾和延誤。而學校屋頂上的接收器，在某種小小的程度上，也參與了這一切。

這個系統的弱點直接源自它的設計，每一個都值得去理解，而不只是列出來。由於訊息以明文廣播，既不加密也不簽章，訊息本身沒有任何東西能證明它來自一架飛機。地面上的發射機可以（非法地）廣播一則格式完美的訊息，描述一架根本不存在的飛機，而接收器會毫無異議地把它解碼。保護這個系統的不是訊息本身，而是訊息周圍的脈絡：一架幽靈飛機不會出現在雷達上、不會被多點定位找到、也不會表現得像真實的交通，而管制中心會持續交叉比對。一個帶有密碼簽章的協定版本已經討論了許多年；障礙與其說是技術上的，不如說是實務上的，因為全世界的每一具詢答機都必須更換。

由於位置依賴於飛機的衛星接收器，任何干擾衛星導航的事物都會干擾 ADS-B。在衝突地區附近，衛星訊號的干擾（jamming）與欺騙（spoofing）已經很常見，飛經這類區域的飛機可能無法算出位置，或可能算出錯誤的位置。這時它的訊息會帶有降級的完整性類別，管制員的系統會標記它們，而雷達，也就是 ADS-B 從來就沒打算完全取代的那種獨立測量，便會接手。因此兩者的關係不是繼任者與前任者，而是弱點互補的夥伴。

由於強制規定涵蓋的是客機和大多數較大型的飛機，而不是所有會飛的東西，這張地圖在設計上就是不完整的。管制空域外的輕型飛機、滑翔機、熱氣球和許多軍用飛機可能根本沒有 ADS-B，有些輕型飛機則使用 1090 MHz 接收器聽不到的其他系統。而且，由於廣播能識別飛機，它也能識別飛機的擁有者：追蹤某一架私人噴射機，實際上就是在追蹤某一個人，這促成了一些應擁有者要求而隱藏飛機註冊號碼的計畫，也引發了一場持續的爭論：一架飛機向全世界廣播的資訊，是否也可以是私人的？這是一個很適合拿來問高年級學生的問題，因為物理無法回答它。

第 12 章

簡史

> **1935 至 1945 年**
> 英國、德國和美國發展出初級雷達；到戰爭結束時，「敵我識別」詢答機會以編碼回覆來回應雷達脈衝，這就是次級雷達的前身。

1950 至 1960 年代
民用次級雷達標準化：1030 MHz 詢問、1090 MHz 回覆、Mode A 識別碼與 Mode C 高度。

1980 年代
具備獨一無二的 24 位元位址和資料訊息的 Mode S，由麻省理工學院林肯實驗室開發，並獲 ICAO 採用。GPS 開始供民間使用。

1990 至 2000 年代
ADS-B 被定義並進行試驗，尤其是在阿拉斯加，那裡無法建立雷達涵蓋，事故頻繁。1090 MHz 延伸自發訊號在國際間標準化。

2010 年代
便宜的軟體定義無線電讓接收成為一種嗜好；由數千個接收器組成的志工網路相繼出現。接收器被送上衛星，以涵蓋海洋上空。

2020 年
ADS-B 在美國（1 月）和歐盟（6 月，過渡期至年底）成為管制空域中大多數飛機的強制配備。天空開始說話，無所不在，無時無刻。

名詞解釋

ADS-B
Automatic Dependent Surveillance - Broadcast（廣播式自動相關監視）。飛機廣播自己的位置。

氣壓高度
由氣壓依標準大氣推算出的高度；也就是飛機所回報的高度。

CPR
緊湊位置回報，一種偶數/奇數的編碼方式，把精確位置塞進 34 個位元。

CRC
循環冗餘檢查，每則訊息結尾的 24 位元錯誤檢查。

延伸自發訊號
攜帶 ADS-B、長 112 位元、主動發送的 Mode S 發射（extended squitter）。

GNSS
全球導航衛星系統：GPS、Galileo、GLONASS、北斗（BeiDou）。

ICAO 位址
飛機詢答機永久的 24 位元身分。

Mode S
ADS-B 所依據的選擇式次級雷達標準。

多點定位
根據訊號抵達多個接收器的時間差，找出發射源的位置。

路徑損耗
訊號隨距離減弱，遵循平方反比定律。

無線電地平線
天線與飛機之間的直線仍能越過地球表面的最遠距離。

SDR
軟體定義無線電：一種把原始訊號樣本交給電腦解碼的調諧器。

SSR
次級監視雷達：地面發出詢問，詢答機回覆。

詢答機
回應雷達並在 1090 MHz 上發送 ADS-B 的機上無線電。

波長
波相鄰兩個波峰之間的距離：c / f，在 1090 MHz 時為 27.5 公分。

下一步

從理論到實作：動手做接收器

十二章解釋了一個您現在就能握在手中的系統。動手做工作坊把它們變成一個下午的工作：花 100 至 150 歐元該買什麼、如何製作和放置天線、如何準備 Raspberry Pi 並安裝 Dataero 資料提供程式，以及如何看著您聽到的飛機出現在即時地圖上，並記在您的站台名下。上面的每一章，在那裡都有一項等著您的測量：用真實飛機驗證無線電地平線、在訊號欄中觀察平方反比定律、天空每天的節奏。

開啟動手做工作坊 https://radar.dataero.eu/zh-hant/learning/workshop