物理與資訊 - 12 至 18 歲

解碼天空

下面這行十六進位數字是一則真實的訊息，由一架真實的航空器大約每秒發送兩次。它只用 112 百萬分之一秒，就宣告這架航空器是誰，並在與它搭配的其他訊息中說出它在哪裡、飛多高、飛多快。這門課會帶你走過理解它所需要的一切：承載它的電磁波的物理、讓航空器知道自己位置的計時原理、把它壓縮進 112 個位元的編碼方式、限制它能被聽到多遠的幾何，以及你可以自己動手組裝、親耳「聽見」它的接收器。

學習 - https://radar.dataero.eu/zh-hant/learning/ages-12-18/student　2026-11-21

目錄

一頁看懂 ADS-B
第 1 課 電磁波：無線電是看不見的光
第 2 課 計時與定位：航空器怎麼知道自己在哪裡
第 3 課 訊息：112 個位元，以及如何抓出錯誤
第 4 課 接收距離：地球的曲率與平方反比定律
第 5 課 天線與接收器：從 27 公分的電波到地圖上的一個點
挑戰題
下一步 動手做

一頁看懂 ADS-B

> 8D **4840D6** 202CC371C32CE0 576098
>
> 接收器記錄下來的一則延伸電文（extended squitter）：28 個十六進位數字，共 112 個位元。學完第 3 課，你就能讀懂其中每一個欄位。

航管必須隨時掌握每一架航空器的位置，才能讓它們彼此保持距離：一架巡航中的客機每秒前進 250 m，而在雷達管制下，隔離規則要求航空器之間垂直相隔 300 m 或水平相隔 9 km。七十年來，掌握位置的方法就是雷達：地面站發出脈衝並測量回波的時間；或者採用改良後的二次雷達，詢問航空器上的詢答機，由它在 1090 MHz 上回覆識別碼和高度。雷達有它的限制：它需要極大的功率，天線每轉一圈才看到每架航空器一次，而且無法涵蓋海洋和山區。

ADS-B，也就是「廣播式自動相關監視」（Automatic Dependent Surveillance - Broadcast），把問題反過來處理。每架現代航空器都裝有衛星導航接收器，因此知道自己的位置，誤差只有幾公尺。ADS-B 只是讓航空器的詢答機把這個位置，連同識別碼、高度和速度，大約每秒兩次在 1090 MHz 上廣播出去，不針對任何特定對象。「自動」是因為不需要任何觸發；「相關」是因為資訊完全來自航空器自己的儀器；「監視」是因為它的目的是掌握航空器在哪裡；「廣播」是因為它以明碼發送，任何在收聽的人都收得到。自 2020 年起，歐洲和美國空域中的大多數航空器都必須配備 ADS-B。管制員把它和雷達搭配使用，其他航空器靠它看見彼此，而學校屋頂上一個 25 歐元的 USB 接收器，收到的也是一模一樣的訊息。

要理解這個系統，你必須搞懂五件事，每一件就是一課：承載訊息的電磁波；讓航空器知道自身位置的計時原理，以及讓接收網路能找出不肯說出自己位置的航空器的方法；數位訊息本身，以及如何抓出其中的錯誤；限制訊號能被聽到多遠的幾何與能量；還有把訊號變回資料的天線與接收器。完整的敘述在參考課程裡；上第 3 課之前請先讀它的第 3 章和第 5 章，上第 4 課和第 5 課之前請先讀第 6 到第 8 章。

第 1 課

電磁波：無線電是看不見的光

訊息以電磁波的形式離開航空器：振盪的電場和磁場在空間中傳播，不需要任何介質，速度是光速 c = 3.00 x 10^8 m/s。可見光是同一種現象，只是頻率更高；你的眼睛能感受大約 4 到 8 x 10^14 Hz 的頻率，而 ADS-B 的發射頻率是 1.09 x 10^9 Hz，低了五十萬倍。航空器的訊息和這個螢幕發出的光在本質上沒有差別，差別只在頻率。

因為波以固定速度前進，它的頻率就決定了它的波長。一秒鐘內，波前進 c 公尺，同時完成 f 次循環，所以每一次循環占 c / f 公尺：c = f x lambda。以 ADS-B 來說，lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m。在航空器和你的天線之間傳遞的這道波，波峰之間相距 27.5 cm，在頻譜上介於手機訊號（17 cm）和 FM 廣播電台（3 m）之間。自己畫一張頻譜圖吧：用對數座標軸，從 10^6 Hz 畫到 10^18 Hz，在上面標出 FM 廣播、ADS-B、手機、Wi-Fi、紅外線、可見光和 X 光。航空器的電波，就落在你口袋裡那些東西的旁邊。

$$c = f \times \lambda$$

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

無線電波不是聲音。聲音是在介質中傳播的壓力波，在空氣中每秒走 343 m，在水中每秒 1 500 m，在真空中則完全無法傳播。無線電是光：它不需要介質，所以能穿越真空，從衛星傳到航空器；而且它比聲音快 3.00 x 10^8 / 343 倍，大約 875 000 倍。如果一架 30 km 外的航空器在同一瞬間發出聲音和訊息，訊息在 100 微秒後抵達；聲音要再過 87 秒才到，那時航空器已經又飛了 22 km。繩子上的波和光共享最重要的那些性質：有波長、有頻率、有固定的速度，所以抖得越快，波越短，而不是越快；不同的是，繩波需要繩子。

電磁波有一個性質在第 5 課會很重要：它的極化方向。電場沿著一個與前進方向垂直的固定方向振盪。航空器的天線是垂直的，所以 ADS-B 電波是垂直極化的；把接收天線橫放，它幾乎什麼都接收不到，就像上下抖動的繩波會被一道水平的窄縫擋住一樣。現在先預測一下：如果天線是水平的，你的接收器的接收距離會怎麼樣？你會在專題中親自驗證。

第 2 課

計時與定位：航空器怎麼知道自己在哪裡

每一則 ADS-B 訊息中的位置都來自衛星導航，而衛星導航其實是在測量時間。每個系統（GPS、Galileo、GLONASS、北斗）大約有三十顆衛星，在約 20 200 km 的高度繞行，每顆都帶著原子鐘，並且不斷發送訊號，說明自己的位置和發送的精確時刻。航空器上的接收器記下訊號抵達的時刻。兩者的時間差乘以 c，就是到那顆衛星的距離；從正上方傳來的訊號需要 20 200 / 300 000 = 0.0673 s。一個距離把接收器放在以那顆衛星為中心的一個球面上；兩個球面相交成一個圓；三個球面相交於兩點，其中一點離地球很遠，可以捨去。如果接收器的時鐘完美無誤，三顆衛星就夠了。但它用的是會漂移幾微秒的石英晶體，而一微秒就等於 300 m 的距離。所以接收器把自己的時鐘誤差當成第四個未知數，再用第四顆衛星：四個方程式、四個未知數（x、y、z 和時鐘偏差），持續不斷地求解。附帶的好處是，每一台衛星接收器都能把時間維持在幾十奈秒的精度內，而這一課的後半段就要靠這一點。

把這些數量級記牢：光每奈秒走 0.3 m，每微秒走 300 m。位置要準確到 3 m，計時就要準確到 10 ns。如果某顆衛星的時鐘快了 1 微秒，所有使用它的接收器都會沿著指向它的方向被推偏 300 m，這就是為什麼地面每天要校正衛星時鐘好幾次。

航空器有兩種高度。衛星解算得到的是相對於參考橢球面的幾何高度。但它為航管目的而廣播的高度是氣壓高度：機身上一個開孔處的氣壓，透過國際標準大氣換算成高度。國際標準大氣假設海平面為 1013.25 hPa、15 度 C，且每公里降溫 6.5 度。當實際氣壓與標準不同時，每架航空器的氣壓高度都會偏差同樣的量，而這正是隔離所需要的：兩架分別顯示飛行高度層 350 和 360 的航空器，不論天氣如何，都相隔 1 000 ft。位置訊息以 25 英尺為一級傳送氣壓高度；速度訊息則傳送氣壓高度與幾何高度之間的差值。如果你會用試算表，可以把 p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255 反過來算，驗證在 11 000 m 時氣壓大約是 227 hPa，不到海平面的四分之一：客機飛行時周圍的空氣，稀薄到會讓你失去意識。

現在把整個想法倒過來。有些航空器在 1090 MHz 上發射訊號卻不帶位置：例如只用識別碼和高度回應雷達的舊型詢答機，或者衛星訊號遭到干擾的航空器。一個接收器網路仍然可以用多點定位（multilateration）找出它們。假設四台時鐘同步的接收器各自記錄同一次發射的抵達時間。如果一則訊息比接收器 B 早一微秒抵達接收器 A，表示它是從一個離 A 比離 B 近 300 m 的點發出的；所有這樣的點構成一個以 A 和 B 為焦點的雙曲面。四台接收器可以組成三對獨立的配對，得到三個雙曲面，它們的交點就是航空器。這就是衛星問題，只是把已知和未知對調了：在衛星問題裡，是一台接收器和四個已知的發射器；這裡則是一個發射器和四台已知的接收器。兩者測量的都是時間，而 1 微秒就是 300 m。接收器透過航空器所用的同一批衛星，把彼此的時鐘同步到大約 100 ns。

你可以用聲音來做這個實驗。三個人拿著碼錶，站在操場上事先量好位置的地點；第四個人躲起來拍一下手；每個人記下聽到的延遲。聲速是 343 m/s，0.1 s 的時間差就是 34 m，用比例尺圖試著擺放位置，或畫出雙曲線的草圖，就能找出拍手的人。接著想一想：如果要用無線電在 200 km 的範圍內做同樣的事，碼錶需要多精確？你就會明白為什麼接收網路需要原子鐘等級的時間。

第 3 課

訊息：112 個位元，以及如何抓出錯誤

詢答機以 Mode S 延伸電文（extended squitter）的形式發送 ADS-B：先是 8 微秒的前導碼，接著是 112 個資料位元，每微秒一個位元。前導碼是四個脈衝構成的固定圖樣，分別位於 0、1、3.5 和 4.5 微秒處，它的任務是回答一個你可能沒想過的問題：在一個充滿雜訊和其他航空器訊號的頻道裡，接收器怎麼知道一則訊息開始了，以及每個位元從什麼時候開始？解碼器持續不斷地尋找這個圖樣，一旦看到，這兩件事它就都知道了。你用過的每一種數位協定，從 Wi-Fi 到 QR 碼，都有類似的東西。

發射器只能開或關，那它要怎麼傳送 1 或 0？ADS-B 使用脈衝位置調變。每個一微秒的位元時槽分成前後兩半：前半有脈衝、後半安靜，就是 1；前半安靜、後半有脈衝，就是 0。每個位元永遠恰好有一個脈衝。想想看，為什麼這比「有脈衝代表 1，沒脈衝代表 0」更好？接收器永遠不會失去同步，即使遇到一長串的 0 也一樣，而在那種天真的做法裡，一長串 0 和完全沒有訊號根本分不出來。而且它判斷每個位元的方式，是比較哪一半比較強，而不是看脈衝有沒有超過某個固定門檻，所以從 400 km 外傳來的微弱訊號，和從頭頂傳來的強訊號，都能同樣可靠地解碼。

以脈衝位置調變表示的四個位元：1、0、1、1



每個時槽為 1 微秒。脈衝在前半：1。脈衝在後半：0。

這 112 個位元的配置如下，你應該要能憑記憶重現出來。第 1 到 5 位元：下行鏈路格式，詢答機發出的 ADS-B 是 17。第 6 到 8 位元：能力碼。第 9 到 32 位元：24 位元的 ICAO 位址，也就是航空器在註冊時取得的永久身分；總共有 2^24 = 16 777 216 個，按區塊分配給各國，比利時的區塊是十六進位的 448000 到 44FFFF。第 33 到 88 位元：56 位元的訊息欄位，它的前五個位元是類型碼，說明其餘 51 個位元裝的是什麼。類型碼 1 到 4 承載呼號，由八個 6 位元字元組成，每個字元有 64 種符號。類型碼 9 到 18 承載空中位置：12 位元、以 25 英尺為一級的氣壓高度，一個奇偶旗標，以及各 17 位元的經緯度編碼。類型碼 19 承載速度：東西向和南北向的地速分量、垂直速率，以及氣壓高度與幾何高度的差值。第 89 到 112 位元：24 位元的同位檢查碼。驗算一下：12 位元的高度、每級 25 ft，可以涵蓋 102 400 ft；若把 17 位元直接用在 180 度的緯度範圍上，解析度只有 1.4 km。實際的位置比這精確得多，靠的是緊湊位置報告（CPR）：這 17 位元只給出在某個區域內的位置，精確到幾公尺，但沒說是哪個區域；航空器在兩套區域網格（偶數和奇數）之間交替發送。接收器只要各收到一則，就能毫無疑義地確定區域，之後就能靠單一訊息持續追蹤。用同樣的位元換來更高的精度，代價是時間。



來拆解本頁最上方那則真實訊息。8D4840D6202CC371C32CE0576098 共 28 個十六進位數字，也就是 112 個位元。前兩個數字 8D，換成二進位是 1000 1101；前五個位元 10001 等於 17，所以這是詢答機發出的 ADS-B，接下來三個位元 101 表示能力碼 5。接下來六個數字 4840D6 是 ICAO 位址，根據分配表，它屬於荷蘭。再下一對數字 20 以 00100 開頭，也就是類型碼 4，一則識別訊息；把後面的 6 位元字元解碼，就得到呼號 KLM1023。最後六個數字 576098 是同位檢查碼。用試算表或幾行程式碼，你就能完成整個解碼。這一課的目標是：看著一行十六進位數字，就能說出「這是一架荷航航空器，正在宣告它是 1023 號班機」。

同位檢查碼最值得好好思考。在繁忙的機場上空，不同航空器的發射訊號經常在接收器處重疊，個別脈衝也會被雜訊淹沒；解碼器難免偶爾會拼出錯誤的位元。最後 24 個位元是循環冗餘檢查（CRC）：把 88 個訊息位元當成一個很長的二進位數字，用一種「減法就是互斥或（XOR）」的特殊算術，除以一個固定的 25 位元生成多項式；餘數就是 CRC。接收器對自己解碼出來的位元再做一次同樣的除法。只要有任何一個位元翻轉、任何兩個位元翻轉，或任何長度不超過 24 位元的連續錯誤，餘數都會改變，訊息就會被拒絕。先用手算，在一則 8 位元的訊息上做一次 4 位元的 CRC，看看它是怎麼運作的；如果你會寫程式，就實作真正的 CRC-24，驗證範例訊息能通過檢查，而翻轉任何一個位元都會讓它失敗。這就是每一個現代系統做錯誤偵測的方式，而在這裡，漏掉一個錯誤，就可能讓管制員的螢幕上出現一架幽靈航空器。

第 4 課

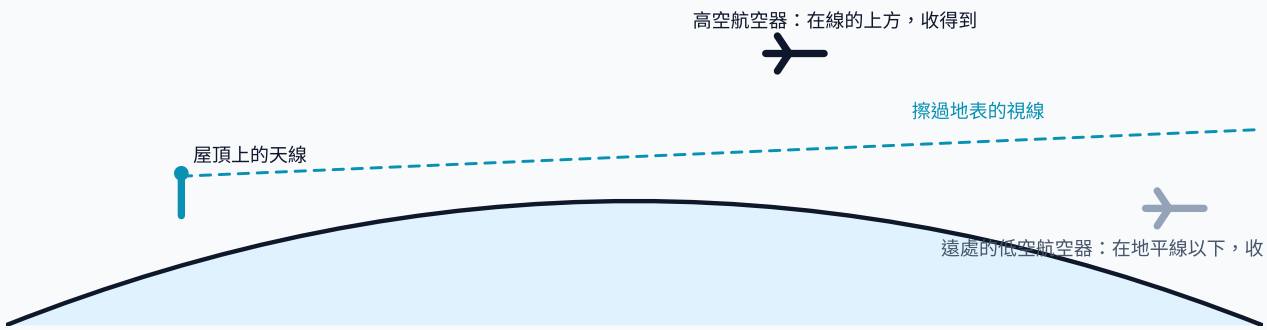
接收距離：地球的曲率與平方反比定律

接收器能聽到多遠的航空器？有兩種不同的限制，值得分開來看。第一種是幾何上的。在 1090 MHz，無線電不會繞著地球彎曲；它沿直線傳播，所以接收器只能聽到在它地平線以上的航空器，也就是從航空器到天線的直線不會被地面擋住的那些。來推導地平線的距離。一根高度為 h、位於半徑 R 的球體上方的天線，它的地平線就在視線與球面相切的地方；切線和兩條半徑在切點形成直角，所以 d^2 + R^2 = (R + h)^2，得到 d^2 = 2Rh + h^2，又因為 h 和 R 相比小到可以忽略，所以 d = sqrt(2Rh)。以 R = 6 371 km、h 以公尺

為單位，d (km) = 3.57 sqrt(h)。大氣的折射率隨高度降低，會讓無線電稍微向下彎曲；標準的修正方式是把地球當成半徑為實際的三分之四倍，也就是把 3.57 換成 4.12。從高度 h1 的天線到高度 h2 的航空器，完整的視線距離是兩段地平線距離之和：

$$d\ (\text{km}) = 4.12 \times (\ \sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\ ) \quad \text{with } h_1, h_2 \text{ in metres}$$

天線在 20 m 高的屋頂上，航空器在 11 000 m：4.12 x (4.47 + 104.9) = 451 km。同一根天線，航空器在 1 000 m：149 km。30 km 外跑道上的航空器：4.12 x (4.47 + 2) = 27 km，所以收不到。



用你自己天線的高度，畫出 d 對 h2 的圖。曲線一開始很陡，之後漸趨平緩，它解釋了每一台接收器涵蓋範圍的形狀：巡航中的航空器可達 400 km 以上，進場中的航空器只有幾十公里，地面上的則什麼都收不到，除非機場就在隔壁。它也解釋了為什麼高度是接收器最重要的特性，以及為什麼一座山丘、一棟建築，或是航空器轉彎時自己的機翼，都能瞬間切斷一條航跡。

第二種限制是能量。詢答機發射幾百瓦的功率，在水平方向上大致均勻地向四面八方散開。在距離 d 處，這些功率分布在面積為 4 pi d^2 的球面上，所以一根有效面積固定的天線截收到的功率會隨 1 / d^2 遞減：這就是平方反比定律，你應該從球面面積推導出來，而不是死背。距離加倍，功率剩四分之一；距離十倍，剩百分之一。工程師用分貝來表示損耗：10 dB 代表功率相差十倍，3 dB 代表相差兩倍，因為分貝能把橫跨許多數量級的乘法變成加法。兩根簡單天線之間的自由空間路徑損耗為：

$$\text{path loss (dB)} = 20 \log_{10}(\ d \text{ in km}\ ) + 20 \log_{10}(\ f \text{ in MHz}\ ) + 32.44$$

在 400 km、1090 MHz：52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 dB。250 W 的發射器是 +54 dBm；接收功率為 54 - 145 = -91 dBm，大約 8 x 10^-13 W。

這個數字值得停下來想一想：屋頂上的接收器所偵測到的訊號，比離開航空器時弱了 10^14.5 倍，只有百萬分之一的百萬分之一瓦。一台好的業餘接收器能解碼到大約 -100 dBm，所以在 400 km 處還有 9 dB 的餘裕。換句話說，對巡航中的客機而言，能量的極限和幾何上的地平線剛好落在同一個地方，而這是刻意設計的：詢答機功率和接收器標準的規定，就是讓航空器在地平線以內都聽得到，但不會遠太多，這樣頻道才不會被鄰國的航班訊號塞滿。

兩點補充。都卜勒效應：一架以 250 m/s 接近的航空器，會讓接收頻率偏移 f v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz，不到百萬分之一，接收器根本察覺不到；對比同一架航空器的聲音，v / c 是 250 / 343，飛過時音調會下降將近一個八度。還有傳播時間：400 km 以光速走需要 1.33 ms，所以廣播的位置抵達時已經是 1.33 ms 前的了，這段時間航空器移動了 33 cm；對地圖來說可以忽略，但對多點定位來說卻是決定性的，因為它靠的正是這些微秒。

第 5 課

天線與接收器：從 27 公分的電波到地圖上的一個點

天線是一根導體，經過的電磁波會在其中感應出交流電；同樣的裝置，如果用電流驅動，就會發射電波；接收天線和發射天線是同一個東西，只是反過來運作。當導體共振時，感應電流最大，也就是當導體的長度讓沿著它分布的電流剛好符合電波的振盪，就像長度剛好的琴弦會和某個特定音高共鳴一樣。直導體的基本共振出現在半波長，在 1090 MHz 是 13.75 cm，電流在中央最大，在兩端為零。實際使用的 ADS-B 天線，無論在航空器上還是大多數接收器上，都是四分之一波長單極天線：一根 6.9 cm 的垂直振子，立在導電的接地平面上，接地平面會形成它的鏡像，振子和鏡像合起來就構成半波偶極天線。在航空器上，機身就是接地平面；買來的 1090 MHz 天線把同樣的幾何結構藏在管子裡，還堆疊了好幾層。自製的天線只要差個幾公釐就會失諧，只能聽到一小部分的天空，這就是為什麼專題中的接收器使用出廠前就調校好的天線。

垂直單極天線對地平線方向最敏感，沿著它自身的軸向則完全不敏感；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。所以你的接收器能完美地收到 300 km 外的航空器，卻會在航空器從正上方經過時漏掉它幾秒，你可以親眼看到這件事發生。共線天線把好幾個共振振子疊在一起，把甜甜圈壓得更扁，以頭頂上方的盲區為代價，提高地平線方向的靈敏度：這就是天線增益，以 dBi 表示，它來自靈敏度的重新分配，而不是憑空產生。還有第 1 課學到的：天線必須垂直，因為電波是垂直極化的。

從天線到地圖上的一個點，要經過四個階段。帶通濾波器讓 1090 MHz 通過，擋掉頻率相差幾百 MHz、強得多的手機訊號，否則這些訊號會讓後面所有的電路飽和。裝在天線端的低雜訊放大器，在訊號進入電纜之前把它放大一千倍，因為在 1090 MHz，電纜每十公尺大約損耗 3 dB，也就是一半的訊號；如果在電纜之後才放大，你也會把電纜的雜訊一起放大。軟體定義無線電（SDR）是一個 20 歐元的 USB 裝置，原本是當作電視調諧器販售的，它把訊號降頻，並以每秒兩百萬次的速率取樣，變成一串數字。從這裡開始就是寫程式的事了：免費軟體在取樣中尋找前導碼，測量每個微秒時槽的哪一半能量比較多，拼出 112 個位元，計算 CRC，如果通過，就解碼各個欄位。接著追蹤器把偶數和奇數的位置訊框配對，依 ICAO 位址把位置、速度和識別資料合併起來，並保留每架航空器的狀態，直到不再收到訊息為止，通常是因為它降到了地平線以下。

把這條鏈畫出來，並標出每個階段的數量：天線處是奈伏特，放大器之後是微伏特，無線電輸出每秒兩百萬個取樣，解碼器輸出每秒幾百個訊框，追蹤器輸出每架航空器一筆紀錄。地圖上的一個點，就是一條長鏈的末端，而鏈上的每一環都是這門課的一個概念：共振、濾波、放大、取樣、圖樣比對、解碼、錯誤檢查、彙整。專題就是把這條鏈做出來，拿天空來檢驗這門課：測量你的最大接收距離與高度的關係，並和地平線公式比較；比較天線放在室內、窗邊和屋頂上，垂直和水平的差別；記錄一整天的航班，找出最忙碌的時段和典型的巡航高度；解碼原始訊息，並用你自己的程式驗證 CRC。然後提出這個系統引發卻沒有回答的問題：訊息沒有數位簽章，那什麼能阻止有人廣播一架幽靈航空器？航空器依賴可能被干擾的衛星，那衛星被干擾時，管制員看到的是什麼？資料能識別航空器，而航空器能識別出人，那誰應該能追蹤誰？

挑戰題

每一題都先在紙上算出來。核對時會顯示答案和推理過程。

1. **1. 1090 MHz 訊號的波長是多少？適用的四分之一波長天線有多長？**

2. **2. 訊息比聲音快多少倍？一架 30 km 外的航空器同時發出兩者，聲音抵達時它已經飛了多遠？**

3. 3. 接收器的時鐘誤差 2 微秒，會造成多少距離誤差？為什麼衛星接收器需要四顆衛星，而不是三顆？

4. 4. 24 位元的位址能識別多少架航空器？一則以每微秒 1 位元傳送的 112 位元訊息持續多久？加上前導碼的整次發射又持續多久？

5. 5. 在訊息 8D4840D6… 中，下行鏈路格式和能力碼是什麼？ICAO 位址是什麼？

6. 6. 一根接收天線架在 15 m 高。對 9 000 m 的航空器，無線電地平線有多遠？對 300 m 的航空器呢？

7. 7. 為什麼距離加倍，接收功率會變成四分之一？200 km 處的路徑損耗是多少？和 400 km 處的 145 dB 相比如何？

8. 8. 預測一下：如果把天線橫放，或把接收器從屋頂移到一樓，接收距離會怎麼變？

下一步

動手做

這幾課的所有內容，都可以從一扇窗戶驗證。實作工作坊會給你購物清單（大約 100 到 150 歐元，或者用你已經有的 Raspberry Pi）、該選哪種天線以及放在哪裡、安裝 Dataero 接收站軟體的三個指令，還有用真實航空器檢驗公式的各種測量：無線電地平線、平方反比定律、每日的航班節奏。當你的接收器開始為地圖提供資料，它聽到的每一架航空器都會為所有人畫在地圖上，並標上你接收站的名稱。

開啟實作工作坊 https://radar.dataero.eu/zh-hant/learning/workshop

解答

1. 1. 1090 MHz 訊號的波長是多少？適用的四分之一波長天線有多長？
   lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m。四分之一波長振子長 6.9 cm。因為光速固定，頻率和波長必然成反比。
2. 2. 訊息比聲音快多少倍？一架 30 km 外的航空器同時發出兩者，聲音抵達時它已經飛了多遠？
   3.00 x 10^8 / 343 = 大約 875 000 倍。訊息在 100 微秒後抵達，聲音在 87 s 後抵達，這段時間以 250 m/s 飛行的航空器飛了 22 km。
3. 3. 接收器的時鐘誤差 2 微秒，會造成多少距離誤差？為什麼衛星接收器需要四顆衛星，而不是三顆？
   2 x 10^-6 s x 3 x 10^8 m/s = 600 m。只有在時鐘完美時，三顆衛星才能確定 x、y 和 z；時鐘偏差是第四個未知數，所以需要第四顆衛星。
4. 4. 24 位元的位址能識別多少架航空器？一則以每微秒 1 位元傳送的 112 位元訊息持續多久？加上前導碼的整次發射又持續多久？
   2^24 = 16 777 216。資料持續 112 微秒；加上 8 微秒的前導碼，共 120 微秒。
5. 5. 在訊息 8D4840D6… 中，下行鏈路格式和能力碼是什麼？ICAO 位址是什麼？
   8D = 1000 1101。前五個位元 10001 = 17：DF 17，由 Mode S 詢答機發出的 ADS-B。接下來三個位元 101 = 5：CA 5。ICAO 位址是 4840D6，分配給荷蘭。
6. 6. 一根接收天線架在 15 m 高。對 9 000 m 的航空器，無線電地平線有多遠？對 300 m 的航空器呢？
   d = 4.12 x (sqrt(15) + sqrt(9000)) = 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km。300 m：4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km。
7. 7. 為什麼距離加倍，接收功率會變成四分之一？200 km 處的路徑損耗是多少？和 400 km 處的 145 dB 相比如何？
   發射功率分布在面積為 4 pi d^2 的球面上，距離加倍時面積變成四倍。在 200 km：20 log10(200) + 20 log10(1090) + 32.44 = 46.0 + 60.7 + 32.4 = 139 dB，比 400 km 時少 6 dB（相差四倍）。
8. 8. 預測一下：如果把天線橫放，或把接收器從屋頂移到一樓，接收距離會怎麼變？
   橫放：天線與垂直極化的電波形成交叉極化；感應電流取決於沿導體方向的電場分量，所以幾乎收不到。一樓：地平線項 4.12 sqrt(h1) 變小，建築物又擋住視線，所以接收距離大幅下降，低空的航空器尤其明顯。