12 至 18 歲 - 教師用

解碼天空：透過一個真實系統學物理與資訊

五堂課加一個專題。每一課取 ADS-B 的一個部分，完整發展其背後的物理或資訊科學：在學生跟得上的地方做推導，用真實數字演算例題，安排讓概念變得看得見的示範，並指出學生直覺容易出錯的地方。年齡範圍中較小的一端（12 至 14 歲）掌握概念和計算；較大的一端（15 至 18 歲）則跟著推導，並執行專題。

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

目錄

開始之前：為什麼一個真實系統值得花五堂課
第 1 課 - 物理 波與電磁波譜：訊息靠什麼傳遞
第 2 課 - 物理與數學 計時與定位：航空器怎麼知道自己在哪裡，以及網路如何找出不報位置的航空器
第 3 課 - 資訊 數位訊息：112 個位元、如何發送，以及如何抓出錯誤
第 4 課 - 物理 傳播與接收距離：地球的曲率與平方反比定律
第 5 課 - 物理與工程 天線與接收器：從 27 公分的電波到地圖上的一個點
專題 - 兩到四週 組裝一台接收器，拿天空來檢驗物理
學生挑戰題的解答
下一步 專題，一步一步來

開始之前：為什麼一個真實系統值得花五堂課

12 到 18 歲之間所教的物理，大多是零散地教：這裡一個波動單元，那裡一個電磁波譜單元，資訊課裡一個數位資料主題，地理課裡順帶提到衛星。ADS-B 是一個實際運作的單一系統，所有這些片段在其中同時承擔關鍵角色，而且全班可以用一台比課本還便宜的接收器觀察結果。航空器透過測量衛星無線電訊號的時間來確定自己的位置，這是三邊測量和光速。它把結果編碼成帶有循環冗餘檢查的 112 個位元，這是二進位編碼和錯誤偵測。它以 1090 MHz 的脈衝位置調變無線電波發送這些位元，這是頻譜、頻率和波長。電波只能沿著越過地球曲面的直線抵達接收器，而且強度隨距離的平方反比減弱，這是幾何和能量。一根長度為四分之一波長的調諧天線把它轉換成電流，這是共振。而一個接收器網路甚至能從抵達時間差找出一個不報位置的發射器，這正是把衛星問題倒過來。以下每一課都取其中一項，讓它自成一個主題完整發展，ADS-B 是貫穿全程的實例，而不是點綴。

首頁上的參考課程以敘述的方式完整介紹整個系統，全班應在第 3 課之前讀它的第 3 章和第 5 章，在第 4 課和第 5 課之前讀第 6 到第 8 章；它的詞彙表是很好用的講義。本頁假設你已經讀過，並專注於物理和教學。數值慣例全程一致：c = 3.00 x 10^8 m/s、f = 1090 MHz、高度以公尺計、距離以公里計，除非例題另有說明，巡航中的航空器一律取 11 000 m（飛行高度層 360）和 250 m/s。

關於直覺，有兩點提醒。學生進教室時，往往以為無線電波是某種聲音，也以為是「雷達」或「衛星」在看航空器。兩者都是錯的，第 1 課和第 2 課會明確處理這兩點，而它們還會再冒出來；課程的設計讓後面每一課都給你一個新的理由去糾正它們。另外，習慣公式的學生，往往對數量級並不習慣：這門課每一步都大量追問「那有多大？」，因為每微秒 300 m、145 dB 的路徑損耗、2^24 個位址，正是讓物理變得真實的那種數字。

第 1 課 - 物理

波與電磁波譜：訊息靠什麼傳遞

從整門課所依據的觀察開始：航空器的無線電訊息和一道光，是同一種物理現象。兩者都是電磁波，是振盪的電場和磁場，不需要任何介質就能在空間中傳播，速度 c 在真空中對所有頻率都相同，在空氣中也幾乎相同：299 792 458 m/s，全班可以取 3.00 x 10^8 m/s。區分無線電和可見光、可見光和 X 光的，只有振盪的頻率 f。我們的視網膜對大約 4 x 10^14 到 8 x 10^14 Hz 之間的頻率有反應，我們感知為從紅到紫的顏色；ADS-B 的發射頻率是 1.09 x 10^9 Hz，大約低了五十萬倍。電波本身在本質上沒有任何不同，只是我們的眼睛有所選擇。

為全班推導波動方程式，而不是直接給出。如果一道波以速度 c 前進，每秒振盪 f 次，那麼一秒鐘內它前進了 c 的距離，並產生了 f 個完整的循環；因此每個循環占的長度是 c / f。這個長度就是波長 lambda，所以 c = f x lambda。套用到 ADS-B：lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m。航空器和接收器之間的訊息，波峰相距 27.5 cm。請全班在自己畫的對數座標頻譜上標出它：FM 廣播在 100 MHz、3 m，ADS-B 在 1 090 MHz、27.5 cm，手機在 1 800 MHz、17 cm，Wi-Fi 和微波爐在 2 450 MHz、12 cm，然後是紅外線、可見光在 5.6 x 10^14 Hz、540 nm，一直到 X 光。把航空器的電波放在手機和微波爐之間的這個練習，比任何表格都有價值，因為它讓學生明白：這些東西是鄰居。

現在直接處理把無線電當成聲音的誤解，因為它非常普遍，而且這個對比能同時教懂兩種現象。聲音是介質中的縱向壓力波；它的速度是介質的性質，在 20 度的空氣中是 343 m/s，在水中約 1 500 m/s，在真空中則為零。無線電是橫向電磁波，完全不需要介質，在真空中以 c 前進，在空氣中只是慢到難以察覺。給這個差距一個數字：3.00 x 10^8 除以 343 大約是 875 000。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，聲音在 87 秒後抵達；等聲音到達時，航空器已經飛了 22 km。示範的方式是教室裡的一條繩子，以及操場另一頭的一支手電筒：繩波明顯需要繩子，速度由繩子決定；而手電筒的閃光到達另一端，延遲短到沒有人量得出來。明確列出繩子和光共有的性質（是波、有波長、有頻率、速度固定，因此 f 與 lambda 成反比），以及不共有的性質（需要介質、速度只有每秒幾公尺）。

最後談極化，它示範起來很省事，而且在第 5 課會有回報。電磁波的電場沿著一個與前進方向垂直的固定方向振盪。航空器詢答機的天線是垂直的，所以 ADS-B 電波是垂直極化的；接收天線也必須垂直，把它轉成水平就幾乎什麼都收不到。上下抖動的繩波可以穿過紙箱上的垂直窄縫，卻會被水平窄縫擋住；兩片偏光片（取自便宜的 3D 眼鏡）交叉對著窗戶，能對光展示同樣的現象。請全班預測：如果把接收天線平放，接收會怎麼樣？他們會在專題中檢驗這個預測。

可指定的例題
第二種 ADS-B 系統用於美國的輕型航空器，發射頻率為 978 MHz。它的波長是多少？適用的四分之一波長天線有多長？（0.307 m；7.7 cm。）能做出這一題的學生，就掌握了第 1 課。

第 2 課 - 物理與數學

計時與定位：航空器怎麼知道自己在哪裡，以及網路如何找出不報位置的航空器

航空器廣播的所有位置資訊都來自衛星導航，而衛星導航說到底是在測量時間。每顆 GNSS 衛星在約 20 200 km 的高度繞行，帶著一座原子鐘，並發送訊號說明自己的位置和發送的精確時刻。接收器記下抵達的時刻。兩者的差乘以 c，就是到那顆衛星的距離，而單一一個這樣的距離，把接收器放在以衛星為中心、以該距離為半徑的球面上。讓全班自己推出數量：兩個球面相交成一個圓，三個相交於兩點，其中一點離地表很遠，可以捨去。所以只要接收器的時鐘完美，三顆衛星就夠了。但它的時鐘根本談不上完美；石英振盪器

的漂移遠遠超過所需的奈秒等級。解決辦法正是這個主題最精妙的核心：把接收器的時鐘誤差當成第四個未知數，再用第四顆衛星：四個未知數（x、y、z 和時鐘偏差）的四個方程式，持續不斷地求解。因此 GNSS 接收器需要看得到四顆衛星，而附帶的好處是它能把時間維持在幾十奈秒的精度內，這就是為什麼第 5 課網路中的接收器，用和航空器相同的衛星來校準時鐘。

把數量級寫在黑板上，並且不斷回頭提起。光每奈秒走 0.300 m，每微秒走 300 m。1 微秒的計時誤差就是 300 m 的距離誤差；現代接收器幾公尺的精度，對應的是十奈秒等級的計時。從正上方的衛星傳來的時間是 20 200 km / 3.00 x 10^5 km/s = 0.0673 s，從接近地平線的衛星傳來則約 0.086 s，所以接收器是在測量幾毫秒的差異，精度要達到其一億分之一。問全班：如果某顆衛星的時鐘快了一微秒，會發生什麼事？他們應該看得出，每台使用它的接收器都會沿著指向它的方向被推偏約 300 m，這就是為什麼地面每天要校正衛星時鐘好幾次。

把兩種高度分清楚，因為訊息裡兩者都有，學生也一定會問。衛星解算得到的是相對於地球參考橢球面的幾何高度。然而航空器回報的是氣壓高度：機身外的靜壓，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，且每公里降溫 6.5 度。在實際氣壓與標準不同的日子，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。ADS-B 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，所以接收器兩者都能還原。對較大的學生，國際標準大氣的關係式 p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255 是很好的試算表練習：把它反過來由 p 求 h，並驗證 11 000 m 對應約 227 hPa，大約是海平面氣壓的五分之一。

現在把問題倒過來。有些航空器在 1090 MHz 上發射訊號卻不帶衛星位置：例如只用識別碼和高度回應雷達的舊型詢答機，或 GNSS 遭到干擾的航空器。一個接收器網路仍然能找出它們。假設四台時鐘同步的接收器記錄同一次發射的抵達時間。發射器是未知的，接收器是已知的：這就是把已知和未知角色對調的 GNSS 問題。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 m 的點發出的，而所有這種點的軌跡，是一個以 A 和 B 為焦點的雙曲面。四台接收器可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。這就是多點定位（multilateration），它需要接收器的時鐘彼此吻合到約 100 ns，而這是靠衛星達成的。在課堂上，可以用操場練習把它簡化成二維：三位學生拿著碼錶站在事先量好的位置，第四位躲在某處拍一下手，三人記錄經過反應時間修正後的延遲，全班用 343 m/s 畫出雙曲線（或更簡單地，在比例尺圖上試著擺放位置）找出拍手的人。接著問他們：如果要用無線電在 200 km 的範圍內做同樣的事，計時精度必須達到多少？讓他們親身感受碼錶和原子鐘之間的差距。

可指定的例題
兩台相距 60 km 的接收器收到同一則訊息的時間相差 50 微秒。航空器離第一台接收器近了多少？（15 km。）如果兩台接收器的時鐘彼此相差 1 微秒，答案會產生多少誤差？（300 m。）能說明為什麼第二個答案與距離無關的學生，就理解了多點定位的要求。

第 3 課 - 資訊

數位訊息：112 個位元、如何發送，以及如何抓出錯誤

航空器的詢答機以 Mode S 延伸電文（extended squitter）的形式發送 ADS-B 資料：8 微秒的前導碼，接著是 112 個資料位元，剛好每微秒一個位元。從前導碼開始這一課，因為它回答了一個學生還沒想到要問的問題：當頻道裡滿是雜訊和其他航空器的訊號時，接收器怎麼知道一則訊息開始了？前導碼是由四個脈衝構

成的固定圖樣，分別位於 0、1、3.5 和 4.5 微秒處。解碼器不斷地尋找這個圖樣；一旦找到，它就同時知道後面跟著一則訊息，以及每個位元時槽確切從什麼時候開始。學生接觸過的每一種數位協定，從 Wi-Fi 到 QR 碼，都有類似的東西，這正是提出這一點的好時機。

接著是調變。無線電只能開或關，那要怎麼送出 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兩半，前半有脈衝、後半安靜代表 1，前半安靜、後半有脈衝代表 0。在黑板上把幾個位元畫成脈衝，讓全班讀出來。然後問：為什麼這比「有脈衝代表 1，沒脈衝代表 0」這種顯而易見的做法更好？稍加引導，就會出現兩個理由。每個位元永遠恰好有一個脈衝，所以即使遇到一串 0，接收器也能保持同步；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絕對門檻，這讓解碼不受訊號強弱的影響。在那種天真的做法裡，一長串的 0 和完全沒有訊號根本無法區分；在 PPM 裡，它則是一連串穩定落在後半的脈衝，像規律的鼓聲。

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。

接下來是 112 個位元的配置，全班應在這一課結束時能憑記憶重現。第 1 到 5 位元是下行鏈路格式，詢答機發出的 ADS-B 是 17。第 6 到 8 位元是能力碼。第 9 到 32 位元是 24 位元的 ICAO 位址，也就是航空器的永久身分。第 33 到 88 位元是 56 位元的訊息欄位，它的前五個位元是類型碼，說明其餘 51 個位元的內容：識別訊息（類型碼 1 到 4）以八個 6 位元字元承載八個字元的呼號；空中位置（9 到 18）承載 12 位元的氣壓高度、一個表示這是偶數或奇數訊框的旗標，以及各 17 位元的經緯度編碼；速度訊息（19）承載地速的東西向和南北向分量、垂直速率，以及氣壓高度與幾何高度的差值。第 89 到 112 位元是 24 位元的同位檢查碼。安排一些計算：24 位元的位址可容納 2^24 = 16 777 216 架航空器；八個 6 位元字元每個有 64 種符號，足以涵蓋字母、數字和空格；12 位元、每級 25 英尺的高度可涵蓋 102 400 英尺；而 17 位元的緯度如果直接用在 180 度上，解析度只有 1.4 km，這就引出了緊湊位置報告（CPR）所回答的問題。用一段話解釋 CPR：這 17 位元給出在某個區域內精確到幾公尺的位置，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，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。這是利用時間，從同樣的位元中換取更高精度的一個巧妙例子。

DF 5 位元 下行鏈路格式	CA 3 位元 能力碼	ICAO 位址 24 位元 航空器的唯一身分	ME - 有效資料 56 位元 位置、高度、速度、呼號或狀態，依前 5 個位元的類型碼而定	PI 24 位元 錯誤檢查（CRC）

給全班一則真實的訊息，讓他們動手拆解。十六進位字串 8D4840D6202CC371C32CE0576098 共 28 個十六進位數字，112 個位元。把前兩個數字 8D 換成二進位，得到 10001 101：DF = 17，CA = 5。接下來六個數字 4840D6 是 ICAO 位址，分配表把它分配給荷蘭。再接下來的數字 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。有試算表或幾行 Python 的班級，一堂課就能完成整個解碼，而這一課要達成的目標，是能拿起一串十六進位數字說出「這是一架荷航航空器，正在宣告它的班機號碼」。

> 8D **4840D6** 202CC371C32CE0 576098
>
> 8D：下行鏈路格式 17，能力碼 5。4840D6：ICAO 位址，分配給荷蘭。20...：類型碼 4，識別訊息，呼號 KLM1023。576098：24 位元的同位檢查碼。

最後談同位檢查碼，因為它是最值得深入發展的資訊科學概念。在繁忙的機場上空，不同航空器的訊息經常在接收器處重疊，脈衝也會被雜訊淹沒；解碼器難免會拼出錯誤的位元。最後的 24 位元欄位是循環冗餘檢查（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的位元再做一次除法並比較。任何一個位元損壞、任何兩個位元損壞，以及任何長度不超過 24 位元的連續錯誤，都會改變餘數，所以損壞的訊息會被拒絕。先用小規模示範這個概念：用手算在一則 8 位元的訊息上做 4 位元 CRC，或用更簡單的類比，也就是條碼上的檢查碼；接著讓較大的學生用幾行程式碼實作真正的 CRC-24，驗證範例訊息的同位檢查碼算出來正確，而翻轉一個位元就會讓它失敗。這就是每一個現代系統做錯誤偵測的方式，而在這個情境裡，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。

可指定的例題

一次完整的發射持續多久？如果一台詢答機每秒發送 4.5 則延伸電文，它有多少比例的時間在發射 ADS-B？（120 微秒；每秒 540 微秒，即 0.054%。）如果不考慮頻道上發送的其他一切，理論上要多少架航空器共用這個頻道，頻道才會一直處於忙碌狀態？（大約 1 850 架，這就是為什麼最繁忙空域的頻道壅塞是一個真實的工程問題。）

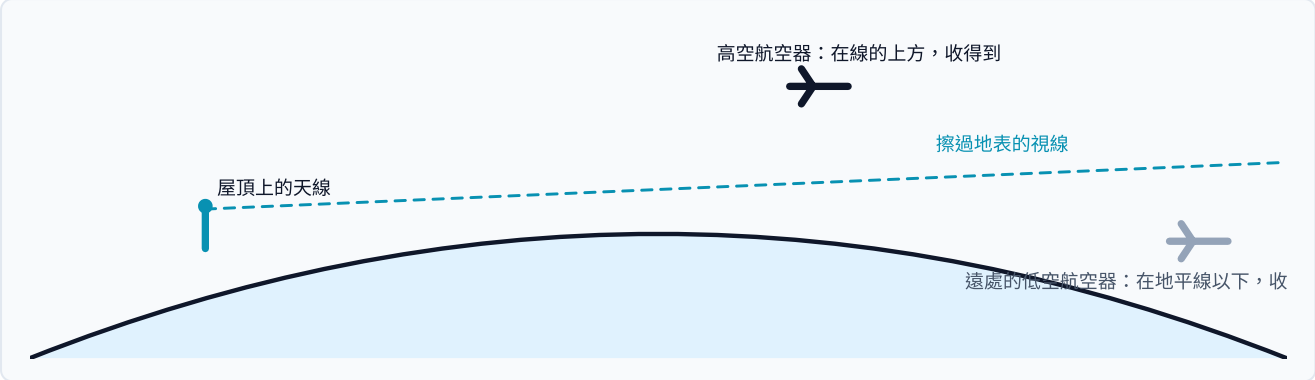
第 4 課 - 物理

傳播與接收距離：地球的曲率與平方反比定律

接收器能聽到多遠的航空器？這個問題有兩個獨立的答案，一個是幾何的，一個是能量的，而這一課的目的就是把兩者都推導出來，並發現設計者刻意讓它們一致。先看幾何。在 1090 MHz，無線電不會有效地繞過地球繞射；它的行為像光，沿直線傳播。因此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穿過地面的那些。和全班一起推導地平線距離。一根位於半徑 R 的球體上方、高度為 h 的天線，它的地平線就在視線與球面相切之處。切線、通往切點的半徑和通往天線的半徑，在切點形成直角，所以由畢氏定理得 d^2 + R^2 = (R + h)^2，即 d^2 = 2Rh + h^2。由於 h 和 R 相比非常小，d = sqrt(2Rh)。以 R = 6 371 km、h 以公尺為單位，d（公里）= sqrt(2 x 6371 x h / 1000) = 3.57 sqrt(h)。大氣的密度，以及隨之而來的折射率，隨高度降低，使無線電射線稍微向下彎曲；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 (km) = 4.12 x ( sqrt(h1) + sqrt(h2) )   with h1, h2 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：4.12 x (4.47 + 31.6) = 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。



請全班用自己學校天線的高度，畫出 d 對 h2 的圖；這條一開始很陡、之後漸趨平緩的曲線，解釋了每一台接收器涵蓋範圍的形狀：巡航中的航班可達半徑 400 km 以上的圓，進場中的航空器只有幾十公里，地面上則什麼都收不到，除非機場就在隔壁。它也解釋了為什麼高度比接收器的任何其他特性都重要，以及為什麼你和機場之間的一座山丘，或航空器轉彎時自己的機翼，都能瞬間切斷一條航跡。國小課程中的操場示範（站在長椅上比蹲著看得更遠），對這個年齡層並不幼稚，只要你接著帶出推導；重點是他們現在知道了為什麼。

現在看能量。詢答機發射幾百瓦的峰值功率，在水平方向上大致均勻地向四面八方散開。在距離 d 處，這些功率已經分布在面積為 4 pi d^2 的球面上，所以有效面積固定的天線截收到的功率隨 1 / d^2 遞減：這就是平方反比定律，全班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。無線電工程師以分貝表示等向性發射器和等向性接收器之間的損耗，標準公式如下，較大的學生可以直接採用，或從天線的有效面積 lambda^2 / 4 pi 推導出來：

```
path loss (dB) = 20 log10( d in km ) + 20 log10( f in MHz ) + 32.44
```

在 400 km、1090 MHz：20 x 2.60 + 20 x 3.04 + 32.44 = 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，也就是百萬分之一的百萬分之一瓦。

如果全班還沒學過分貝，就花幾分鐘介紹，因為分貝能把橫跨十四個數量級的乘法變成加法，而且這個數字本身就很有啟發性：屋頂上的接收器所偵測的訊號，比離開航空器時弱了 10^14.5 倍。一台好的業餘接收器能解碼到大約 -100 dBm，所以在 400 km 處還有約 9 dB 的餘裕，換句話說，對巡航中的客機而言，能量極限和幾何地平線落在同一個地方。這不是巧合；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聽得到，但不會遠太多，這樣頻道才不會被鄰國的發射訊號塞滿。

給較大學生的兩點補充。第一，都卜勒效應：一架以 250 m/s 接近的航空器，使接收頻率偏移 f x v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz，不到載波的百萬分之一，接收器根本察覺不到；對比航空器聲音可聽見的都卜勒偏移，v / c 是 250 / 343，飛過時音調會改變將近一個八度。第二，訊號的傳播時間：400 km 以光速走需要 1.33 ms，所以訊息中的位置已經是 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，但對第 2 課的多點定位來說卻是決定性的，因為它靠的正是這些微秒。

可指定的例題
一台架在 10 m 天線桿上的接收器，收得到 11 000 m 巡航中的航空器，卻收不到 130 km 外、高度 600 m 的輕型航空器。這架輕型航空器在地平線以下嗎？（地平線：4.12 x (3.16 + 24.5) = 114 km，所以是。）接收器要架多高才收得到它？（需要 4.12 x (sqrt(h1) + 24.5) = 130，所以 sqrt(h1) = 7.05，h1 = 50 m。）

第 5 課 - 物理與工程

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；接收天線和發射天線是同一個裝置朝相反方向運作，這種互易性應該明確告訴全班。當導體共振時，感應電流最大：也就是當它的長度讓沿著它分布的電流剛好符合電波的振盪，正如長度剛好的琴弦會和某個特定音高共鳴，或盪鞦韆會配合某種特定節奏的推送。直導體的基本共振出現在半波長，在 1090 MHz 是 13.75 cm，電流在中間最大，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，接地平面在電性上形成它的鏡像，振子和鏡像合起來構成半波偶極天線。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，並堆疊好幾層，把靈敏度集中在地平線方向。在課堂上用一根 6.9 cm 的金屬棒立在鐵罐蓋上做成的模型，可以展示這個幾何結構和長度，並用尺和 27.5 cm 的波長對照；不過專題中的接收器還是使用出廠前調校好的天線，因為自製的天線只要差幾公釐就會失諧，只能聽到一小部分的天空。

發展輻射場型的概念，因為它能預測全班觀察得到的現象。垂直單極天線在地平線方向的發射和接收最強，沿著它自身的軸向則完全沒有；它的靈敏度在三維空間中畫出來，是一個甜甜圈，天線穿過中間的洞。所以接收器通常能完美地收到 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，全班可以在自己的接收器上看到這件事發生。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，提高遠方航空器所在的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。第 1 課的極化，現在有了專題會檢驗的實際後果：天線必須垂直。

在天線和電腦之間有三個階段，每一個都是一堂小課。帶通濾波器讓 1090 MHz 通過，擋掉頻率相差幾百 MHz、強得多的手機發射訊號，否則它們會讓放大器飽和。低雜訊放大器裝在天線端而不是接收器端，在訊號進入電纜之前把它放大一千倍；順序很重要，因為在 1090 MHz，同軸電纜每十公尺大約損耗一半的訊號，也就是 3 dB，若在損耗之後才放大，就會把電纜的雜訊和訊號一起放大。接著是軟體定義無線電（SDR）：一個 20 歐元的 USB 裝置，原本是做成電視調諧器的，它把訊號降頻到基頻，並以每秒兩百萬次的速率取樣，變成一串數字。從這一刻起，無線電問題就變成了程式問題。免費軟體在取樣串流中尋找前導碼圖樣，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。

讓全班自己把這條鏈畫成圖，並標出每個階段的數量：天線處是奈伏特等級的交流電；放大器之後是微伏特；SDR 每秒輸出兩百萬個 8 位元數字；解碼器輸出 112 位元的訊框，大概每秒幾百個；追蹤器輸出每架航空器一筆紀錄。要讓學生領會的重點是：地圖上的一個點，是一條長鏈的末端，而鏈上的每一環，都是他們現在已經理解的概念：共振、濾波、放大、取樣、圖樣比對、解碼、錯誤檢查、彙整。

可指定的例題

某條電纜在 1090 MHz 每 10 m 損耗 3 dB。那麼 20 m 長的電纜會損耗多少比例的訊號？（6 dB，四分之三。）如果接收器的極限是 -100 dBm，而 400 km 外航空器在天線處的訊號是 -91 dBm，沒有放大器的話，訊號能撐過這段電纜嗎？（勉強可以：-97 dBm。只要再多一點損耗，例如接頭淋到雨或電纜更長，地平線上的航空器就會消失。這就是為什麼放大器要裝在天線端。）

專題 - 兩到四週

組裝一台接收器，拿天空來檢驗物理

這個專題把五堂課變成實際測量。設備包括一支 USB 軟體定義無線電接收棒（約 25 歐元）、一根出廠調校好的 1090 MHz 天線（50 到 70 歐元）、幾公尺的同軸電纜，以及一台執行免費解碼軟體的筆記型電腦或 Raspberry Pi（dump1090 及其衍生版本是標準選擇）。安裝只要一個下午，幾分鐘內軟體就會顯示一張航空器列表，列出它們的 ICAO 位址、呼號、位置、高度和速度，還有一張地圖。專題中的一切都只接收；沒有任何東西會發射，全班應該明白，在航空頻率上發射訊號既違法又危險。上屋頂需要學校的一般核准；面向主要航路、位於高樓層的窗戶，就是很好的起點。本網站的「成為接收站」頁面會一步一步說明同樣的安裝過程，並讓學校的接收器為即時地圖提供資料。

第一項探究是無線電地平線。解碼軟體會為每架航空器回報最後一次收到時的距離和高度。蒐集一整天的資料，記錄幾個高度區間中航空器被收到的最大距離，並畫出距離對高度的圖。學生手上有第 4 課的公式和天線高度；他們應該在看到資料之前先預測曲線，再加以比較。高空航空器的吻合度通常很好，低空的則較差，而討論其中的原因（建築物、地形、天線頭頂上方的盲區、航空器自身的遮蔽），正是課本無法提供的那種理論與測量的正面交鋒。軟體會畫出每個方向上收到的最遠航空器的地圖，整個地區的地形會以涵蓋範圍中的陰影呈現出來。

第二項是天線。比較天線放在室內、窗邊和屋頂上；垂直和平放；立在金屬表面上和遠離任何金屬時的訊息速率和最大距離。每一項比較都在檢驗第 1 課和第 5 課的某個具體主張，每個結果都應該先預測。極化測試最令人印象深刻：天線一平放，大部分的航空器就不見了。

第三項是資料。記錄一整天的航班，然後對資料提問：最忙碌的時段、巡航高度的分布（學生原本以為會很分散，結果發現大多數客機都在 10 000 到 12 000 m 之間）、從最近機場起飛的航班爬升率、最常飛過的航空器屬於哪些國家（從 ICAO 位址的分配得知）。較大的學生可以自己從軟體記錄的十六進位資料解碼原始訊息，並用自己的程式驗證 CRC。如果班級在 30 公里以外的夥伴學校有第二台接收器，兩者都輸出 GNSS 時間戳記，就可以嘗試對一架雙方都收得到的航空器做二維多點定位，並和航空器自己廣播的位置比較：這是本課程最有企圖心的成果，而且是真實可行的。

最後以這個系統引發卻沒有回答的問題作結。訊息沒有數位簽章，所以有人可能廣播一架幽靈航空器；是什麼在保護這個系統？加上簽章的版本又要付出什麼代價？航空器依賴可能被干擾的衛星；衛星被干擾時，管制員看到的畫面會怎樣？資料能識別航空器，而一架航空器能識別出一個人；誰應該能追蹤誰？親手組裝過接收器的班級，有資格提出這些問題，它們也很適合作為期末論文或辯論的題目。

學生挑戰題的解答

學生頁面設有八道挑戰題，每課一到兩題，可以當作回家作業或課程結束時的測驗。以下是解答，以及一份滿分答案應包含的推理：

1. 1090 MHz 的波長：lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m。四分之一波長振子：6.9 cm。推理：c = f x lambda，光速固定，使兩者必然成反比。
2. 光比聲音快 3.00 x 10^8 / 343 倍，大約 875 000 倍。在 30 km 的距離上，訊息需要 100 微秒，聲音需要 87 s；以 250 m/s 飛行的航空器在這段時間移動了 22 km。
3. 2 微秒的時鐘誤差造成 2 x 10^-6 x 3 x 10^8 = 600 m 的距離誤差。需要四顆衛星，是因為接收器的時鐘偏差是 x、y、z 之外的第四個未知數。

4. 2^24 = 16 777 216 個位址。以每微秒 1 位元傳送的 112 位元訊息持續 112 微秒，加上前導碼為 120 微秒。
5. 在 8D4840D6… 中，8D 是 10001101：前五個位元 10001 是 17，所以 DF = 17，由 Mode S 詢答機發出的 ADS-B 訊息；接下來三個位元 101 表示 CA = 5。4840D6 是 ICAO 位址。
6. 從 15 m 高的天線到 9 000 m 航空器的無線電地平線：4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km。300 m 的航空器：4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km。
7. 距離加倍時接收功率變成四分之一，因為同樣的發射功率分布在面積四倍的球面上。在 200 km、1090 MHz 的路徑損耗：20 x 2.30 + 60.7 + 32.4 = 139 dB，比 400 km 時少 6 dB，與四倍的比例一致。
8. 平放的天線與垂直極化的電波形成交叉極化，幾乎收不到訊號；感應電流取決於電場沿導體方向的分量。放在一樓的接收器接收距離會縮短，因為它的地平線距離 4.12 x sqrt(h1) 變小，而且建築物擋住了視線。

下一步

專題，一步一步來

第 6 課的專題假設你已經有一台接收器；實作工作坊則帶你把它組裝出來。它是為從沒用過 Raspberry Pi 的人寫的：附價格的購物清單、該選哪種天線、天線的擺放位置和電纜損耗、準備 Pi、安裝 Dataero 接收站軟體的三個指令、認領接收站、調整增益，以及五項測量（每課一項），拿天空來檢驗物理。為 Dataero 提供資料的接收站，會給全班一個儀表板、一張涵蓋範圍地圖，以及一整年的歷史資料可以運用。

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