

1. 序言

天氣變化萬千，人類在過去數十年一直試圖揭開天氣的神秘面紗。為了探索天氣，人類發展了各種各樣的儀器，當中包括一些常規的儀器，比如用作探測風向風速的風速表、量度溫度的溫度表、量度氣壓的氣壓表和記錄雨量的雨量表。很多這類常規儀器只能量度局部地區的天氣情況。由於地球大部份地方被水覆蓋，沒有固定的氣象站來裝置常規儀器，因此這類儀器並探測不到那裏的天氣情況，而遙感技術正好大派用場。

正如其名，「遙感」是遙遠探測天氣或其他現象的一種技術。具代表性的遙感儀器有天氣雷達及氣象衛星。現今它們被廣泛用作監察世界各地的天氣，以支援天氣預測及警報服務。

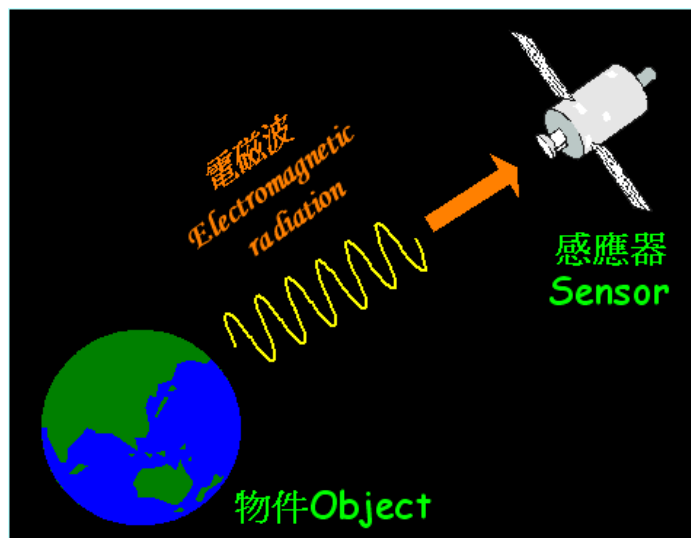
此筆記旨在介紹天氣雷達及氣象衛星，重點放在詮釋雷達及衛星圖像。筆記的前半部份描述遙感的基本概念，亦簡介天氣雷達及氣象衛星的基本運作原理。筆記的後半部份介紹雷達及衛星圖像的詮釋及其在天氣監測方面的應用。

2 基本概念

2.1. 甚麼是遙感呢？

甚麼是遙感呢？遙感乃天氣雷達及氣象衛星運作背後的基本原理。現有多種對遙感的不同描述。在以下的討論，我們採用以下的描述：**遙感**是一種利用**感應器**獲取有關物件**資料**的技術。在獲取資料的過程中，感應器並不直接接觸物件。

以上描述涉及三個元素：物件、資料及感應器。對於天氣觀測來說，物件是指在大氣層中周而復始不斷形成和消散的天氣系統，例如熱帶氣旋、雨帶及雲團等等。資料則是指我們希望得知有關物件的特徵，比如雲的高度、熱帶氣旋的位置及強度、雨帶中雨勢的強度。這些資料是經傳遞媒介由物件傳送至感應器的（圖一）。這傳遞媒介便是**電磁波**，下一節會作討論。遙感儀器的產品，一般是一幅圖像，顯示



圖一 遙感的基本原理。電磁波將資料由物件傳至感應器。

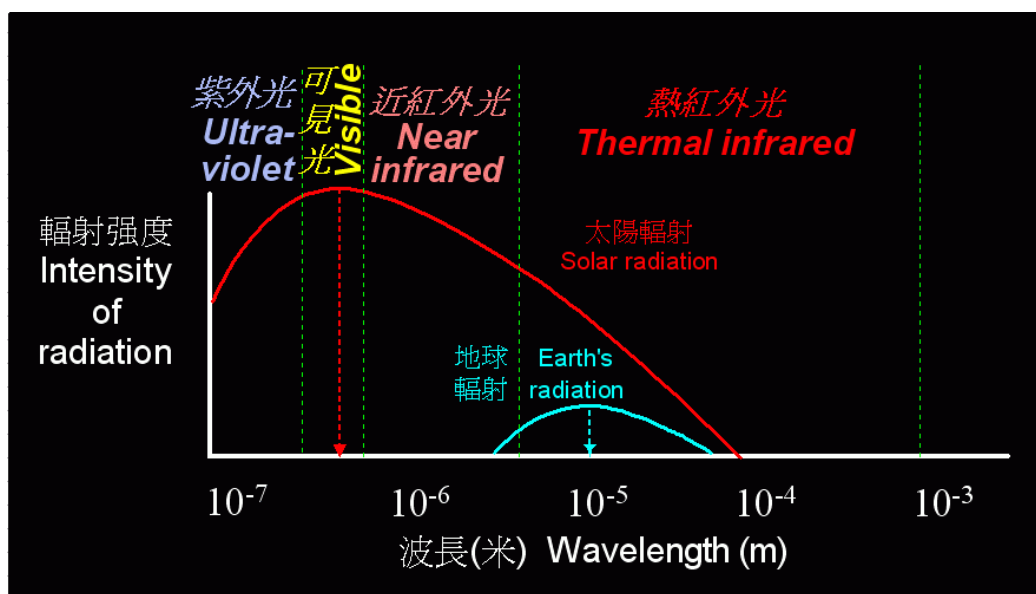
被觀測物件的資料。在電視天氣節目看到的衛星雲圖便是一個例子。

要瞭解遙感儀器的運作，必先要清楚電磁波的種類及它與大氣間的相互作用。下一節有簡單的討論。

2.2 電磁波

甚麼是電磁波呢？若果你對這術語不太熟悉，請不用擔心。電磁波是可見光、紅外光、紫外光、無線電、微波及 X 光等的統稱。不同的電磁波由它們的頻率(或波長)所區別。電磁波頻率越高，其波長則越短，相反亦然。

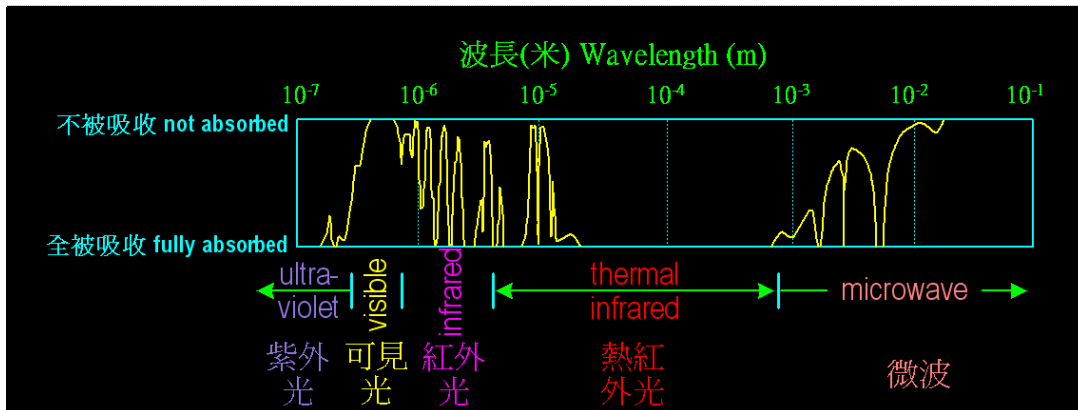
電磁波可謂無處不在。地球上所有物件皆自然地散發電磁波。例如，每一個人都會散發紅外光，一些有「夜視」功能的攝影機便可拍攝到這些紅外光。太陽亦會發射電磁波，這便是肉眼看到的可見光。圖二顯示了地球及太陽所散發的電磁波。圖中可見，地球所散發的電磁波中最強的是熱紅外光。而太陽方面，最強的電磁波便是可見光。事實上，遙感技術所利用的電磁波主要來自太陽。



圖二 地球(—)與太陽(—)所散發的電磁波

以上討論過，電磁波把資料由物件傳遞至遙感器。在途中，電磁波會跟大氣層相互作用。特別是，空氣中的氣體如臭氧、二氧化碳及水汽等會吸收電磁波。因此，只有部份的電磁波能由物件通過大氣層傳至遙感器。圖三展示了大氣層吸收電磁波的程度。可看到，電磁波在某些頻率是較少被大氣所吸收的。這些頻率出現在可見光、紅外光、熱紅外光及微波的波段內。因此這些頻率的電磁波便能行走一段長距離而強度不會減少太多，相當適合作遙感之用。比方，天氣雷達便是利用微波來探測雨區，而

氣象衛星則利用可見光及紅外光來監測天氣。



圖三 大氣層吸收電磁波的情況

2.3 主動式和被動式遙感儀器

現在我們談談遙感儀器的分類。遙感儀器可分為主動式和被動式兩種，這是按照其能否發射電磁波來分類。某些遙感儀器能向物件發射電磁波，並接收自物件反射回來的電磁波。這類感應器是稱為**主動式**感應器。天氣雷達正是這類儀器，它向大氣發射微波，並接收從空氣中水點反射回來的微波的。另一類感應器不會發射電磁波，只是接收自物件發射或反射的電磁波。這一類便是**被動式**感應器。氣象衛星是一個例子。稍後會討論天氣雷達和氣象衛星的運作原理。

主動式感應器有一項優點，是它不需依靠外來的電磁波，因此在物件沒有發射或反射足夠電磁波的情形下仍能運作。但此類感應器必須產生足夠強度的電磁波來照射物件。

被動式感應器只能在物件發射或反射足夠電磁波的情況下，才可作探測之用。因此，一些探測可見光的感應器只能在日間有充足陽光的時刻才能運作。

2.4 陸基和空載遙感儀器

這是遙感儀器的另一種分類。用作遙感的感應器必須安裝在穩定的平台上方可以接收及記錄自物件傳來的電磁波。遙感用的平台可以是安裝在陸地上、在飛機上或者是在地球大氣層以外的衛星上的。在陸地上的感應儀器如天氣雷達是稱為**陸基遙感儀器**。這類儀器是用作探測地面附近物件的資料。受到固定地點所限，陸基遙感儀器只能覆蓋儀器附近的地區。空載遙感儀器位處地球以外的太空，氣象衛星便是這類儀器。由於衛星不停的環繞地球運行，它們的覆蓋面積比陸基遙感儀器的大。

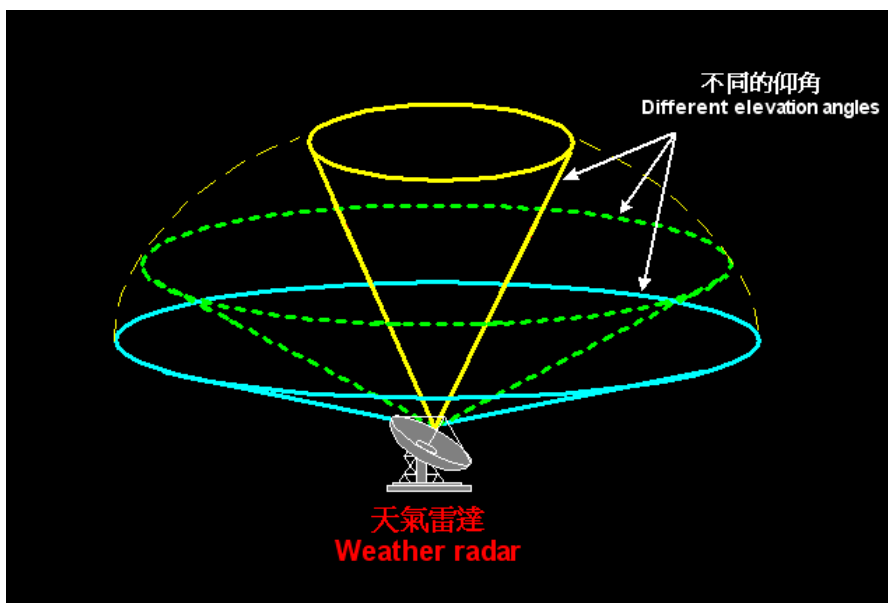
3. 天氣雷達

3.1 甚麼是天氣雷達呢？

雷達的英文名稱 RADAR 是‘RADio Detection And Ranging’的縮寫，意謂以無線電來作探測和找出物件的位置。它是在二次世界大戰期間發展出來的，主要作軍事用途，如探測和找出飛機的位置。戰後科技不斷進步，推動了雷達的急促發展。它們現今已被廣泛應用，包括用於天氣監測和航空交通管制。

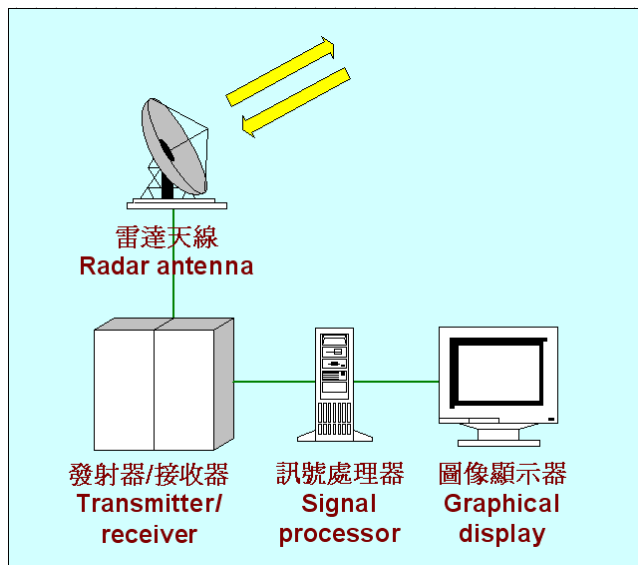
天氣雷達是一種陸基和主動式的儀器。它在一個固定的地點向大氣發射微波，並接收自空氣中小水點反射回來的回波。由於地球和太陽所散發的微波並不強烈，對天氣雷達的運作沒有多大的影響。

天氣雷達不斷地掃描大氣層每個角落，來探測雨區的位置和移動情況。一般來說，雷達是從低的仰角開始，一步步的向高掃描(圖四)。當到達最高仰角時，便回到最低位置從頭開始。天氣雷達是根據這掃描方式來捕捉各方位的雨區的。



圖四 天氣雷達在不同的仰角掃描大氣層。

圖五展示一座天氣雷達的典型構造。雷達的天線一般是座落山頂或塔台上，用來發射和接收微波。這些微波是由一座發射器所產生的。發射器旁的接收器則是用來接收由雷達天線所收集的微波訊號。訊號處理器處理了這些訊號後，便以雷達圖像的形式顯示在圖像顯示器上，供天氣預報員之用。同樣的圖像亦放在互聯網上供市民觀看。



圖五 天氣雷達結構示意圖

香港裝置有三台天氣雷達，分別位於大帽山、大老山及大欖涌(圖六)。前兩台是支援天氣預測服務的，後者是主要支援機場的運作。



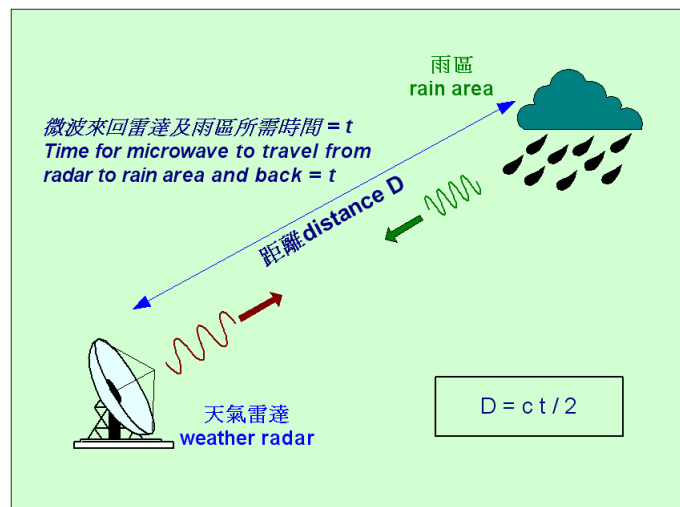
圖六 香港的天氣雷達

3.2 天氣雷達的應用

天氣雷達有三大用處，分別為探測 (i)雨區的位置、(ii)雨勢的大小和 (iii)雨區的移動情況。

3.2.1 雨區的位置

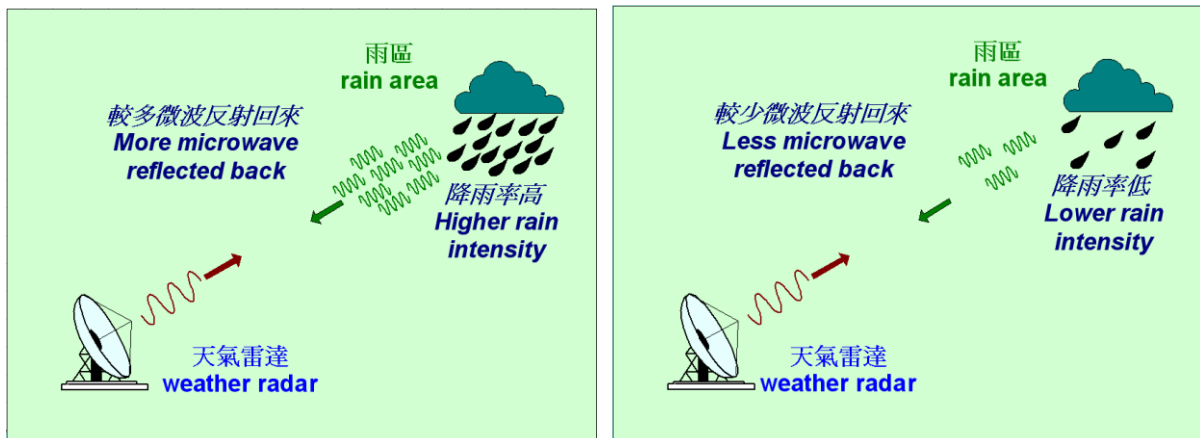
天氣雷達是根據以下的方式來探測雨區的位置：它量度微波往返雷達及雨區所需時間來計算出雨區離雷達的距離(見圖七)。



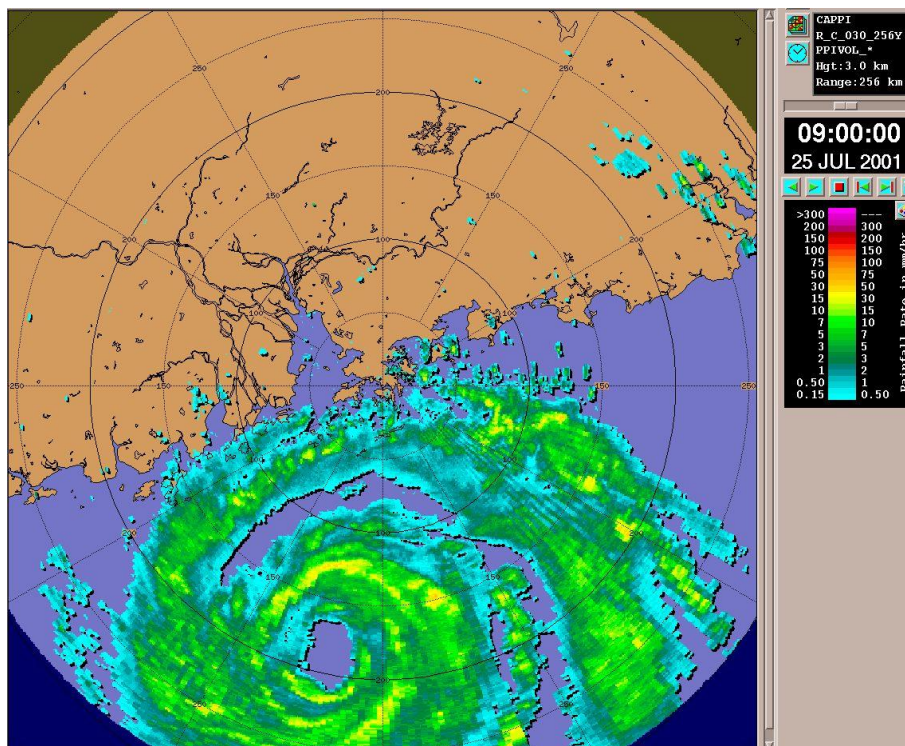
圖七 天氣雷達探測雨區的位置

3.2.2 雨勢

天氣雷達是籍著比較發射微波和反射微波的強度來計算雨勢的大小的。若果雨勢大時，空氣中小水點的密度高，反射回來的微波強度則較高。因此天氣雷達能顯示雨區的雨勢下小(見圖八)。圖九展示了二零零一年七月颱風玉兔的圖像，可看到雨帶中雨勢的強弱變化。



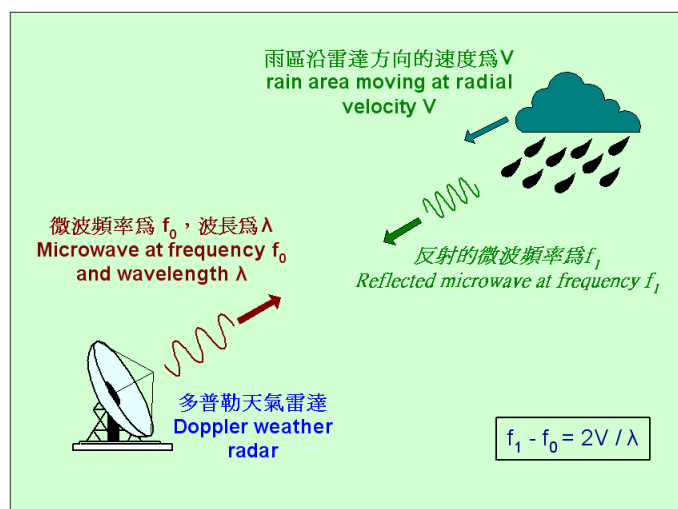
圖八 天氣雷達探測雨勢的大小



圖九 二零零一年七月二十五日香港時間上午九時颱風玉兔的圖像。圖中顯示玉兔的風眼和螺旋形雨帶。黃色的地方表示雨勢超過每小時 15 毫米，而綠色表示雨勢低於每小時 15 毫米。

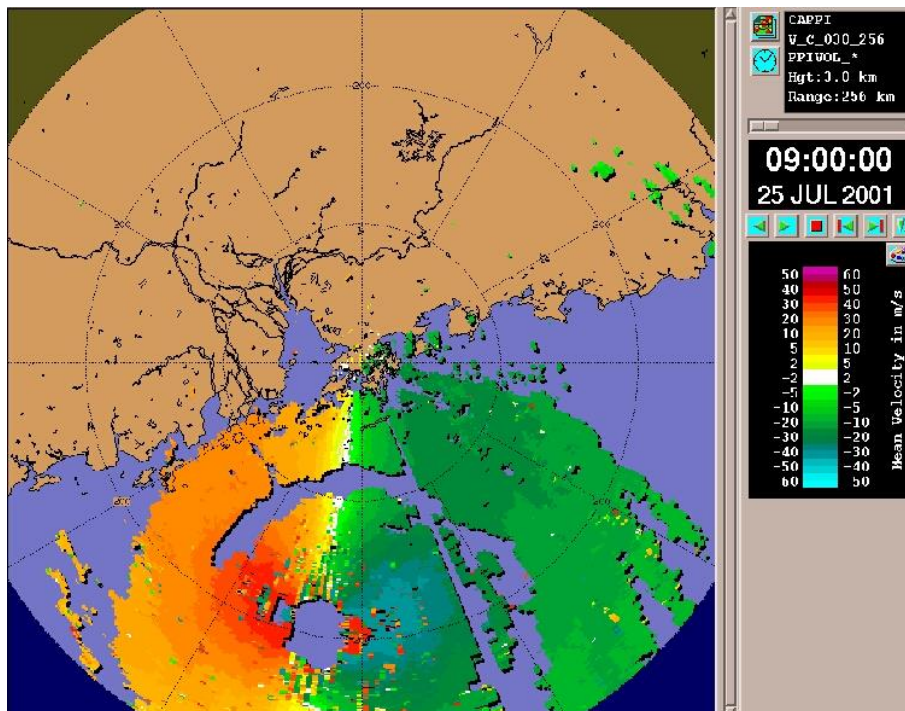
3.2.3 雨區的移動速度

天氣雷達當中有一種名為「多普勒」天氣雷達，能探測雨區的移動速度。這類天氣雷達發射固定頻率的微波脈衝。微波脈衝在碰到雨區後，其頻率會偏移。這頻率偏



圖十 天氣雷達探測雨區的移動情況

移與兩區在雷達方向的速度(即徑向風)成正比(圖十)。上述現象名為「多普勒效應」。這種效應在日常生活中也可以找到。例如，當一輛救護車在你身邊經過時，它的響號音調會有所改變，這便是多普勒效應。圖十一是一幅颱風玉兔的圖像，顯示了玉兔雨帶的徑向風。



圖十一 二零零一年七月二十五日香港時間上午九時颱風玉兔的圖像。顯示了玉兔雨帶的徑向風。

3.3 天氣雷達圖像的種類

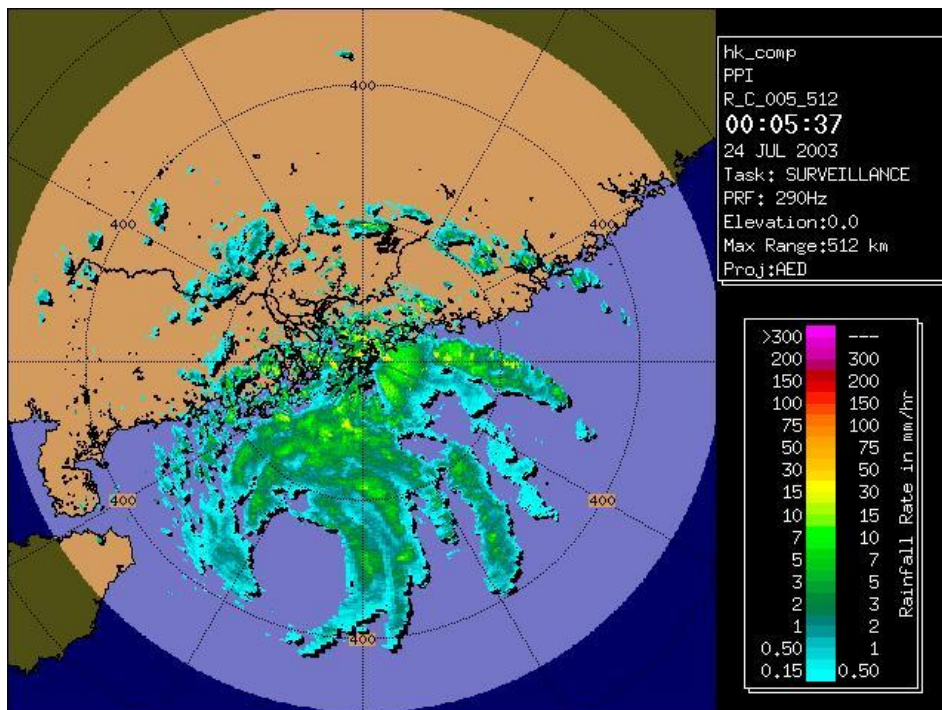
天氣雷達圖像大致可分為三種：

3.3.1 平面圖

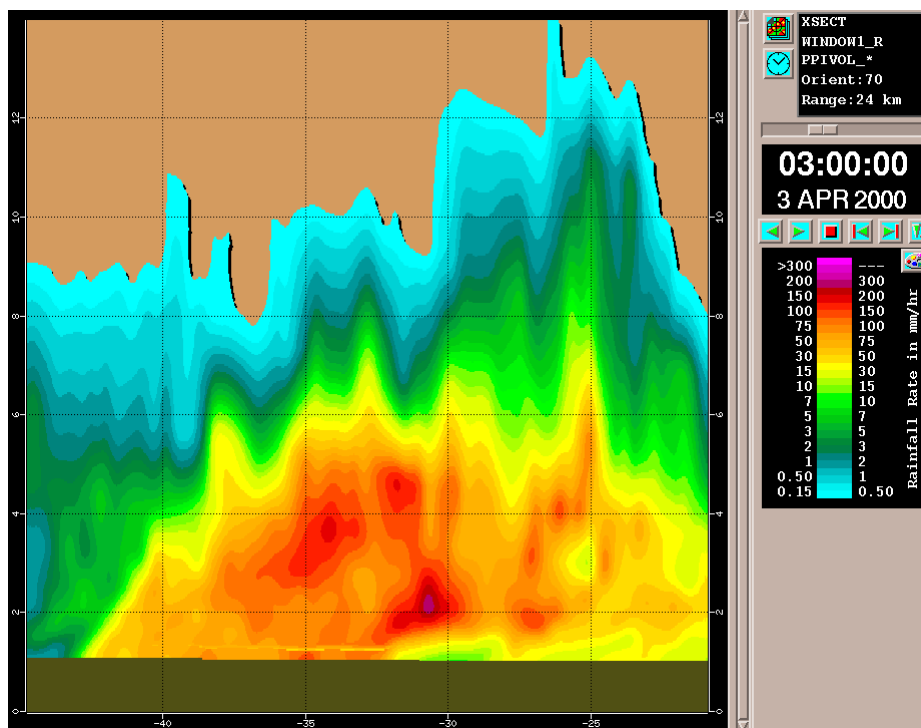
這類圖像顯示雨區的位置及其分佈，對監測雨區和熱帶氣旋的發展和動向很有幫助(圖十二)。

3.3.2 垂直剖面圖

這類圖像顯示雨區在垂直方向的發展，可用於監測雷暴和冰雹(圖十三)。



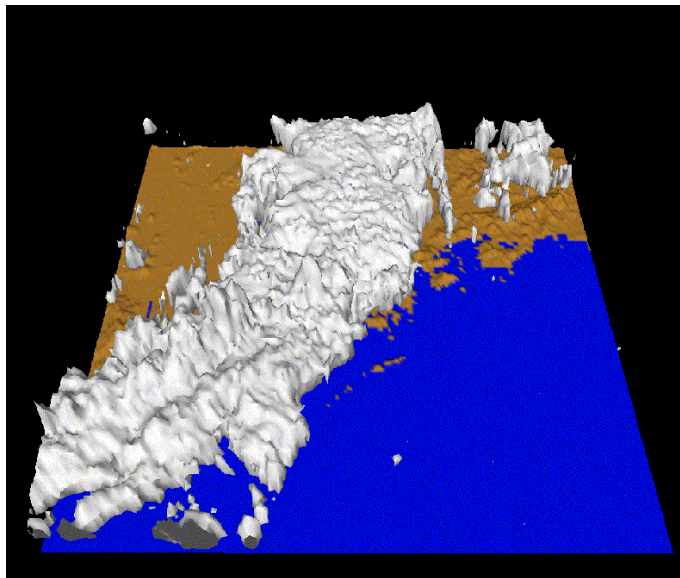
圖十二 二零零三年七月二十四日香港時間凌晨颱風伊布都的圖像。伊布都的風眼清晰可見。當時正移向廣東西部。



圖十三 二零零零年四月三日香港附近的一個雷雨區的垂直剖面圖。

3.3.3 立體圖

立體圖顯示了雨區的立體影像，較高的雨帶雨勢一般較大(圖十四)。

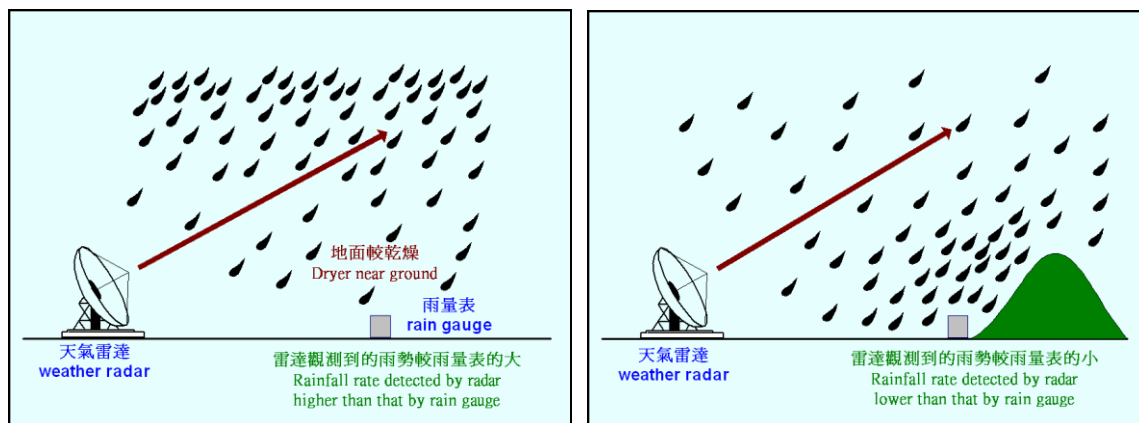


圖十四 二零零一年七月六日香港時間晚上八時的立體雷達圖像，顯示有一雨帶橫越珠江口。

3.4 天氣雷達的限制

3.4.1 量度降雨率

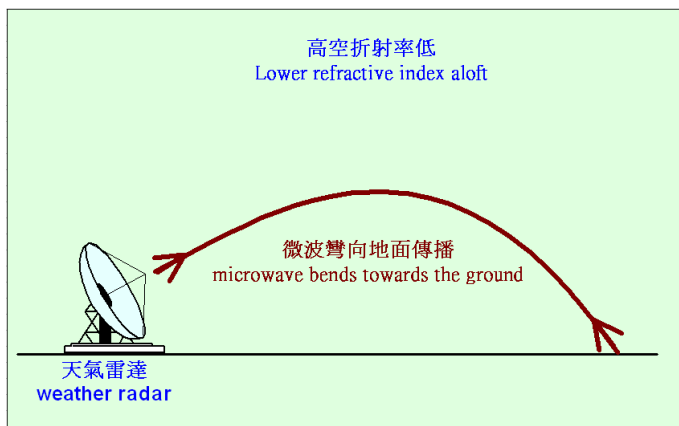
天氣雷達並不是直接量度降雨率的，而是從反射微波的強度轉化成降雨率。另外，天氣雷達探測到的是半空中水點反射的微波，因而雷達圖像所顯示的降雨率與地面上雨量表所量度到的可能並非一樣(圖十五)。



圖十五 天氣雷達探測到的降雨率可能與地面雨量表錄得的有異。

3.4.2 異常傳播

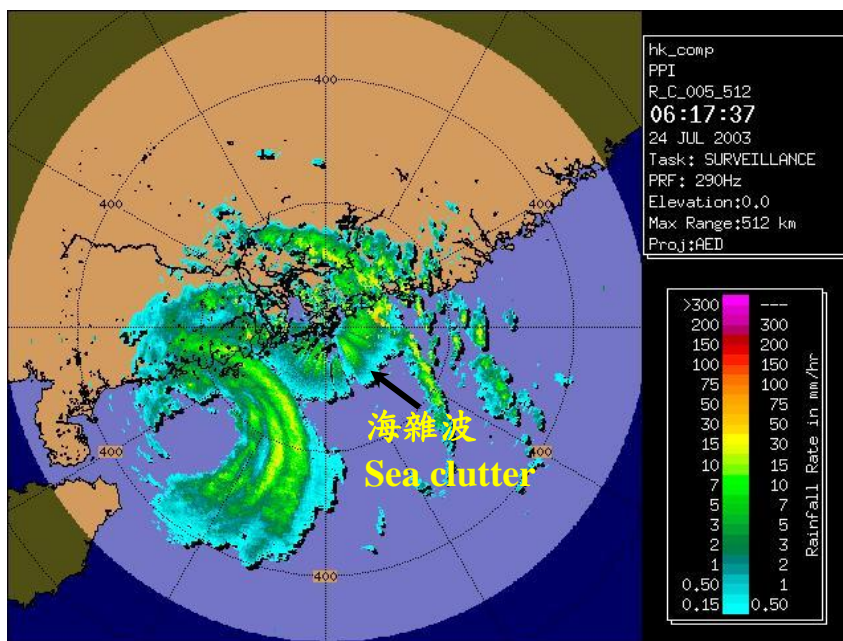
電磁波在空氣中的傳播速度較之在真空中慢。平常來說，高空的折射率較低空為低，這使天氣雷達的微波在高空中傳播較快。這樣，微波會稍為彎向地下方向傳播。當大氣層較穩定時(如逆溫層出現時)，微波向下彎曲的程度較正常大(即出現超折射)，而導致天氣雷達探測到遠方地面的物件。這叫做**異常傳播**(圖十六)。異常傳播的出現，或會令天氣預報員誤作雨區。



圖十六 異常傳播示意圖。

3.4.3 雜波

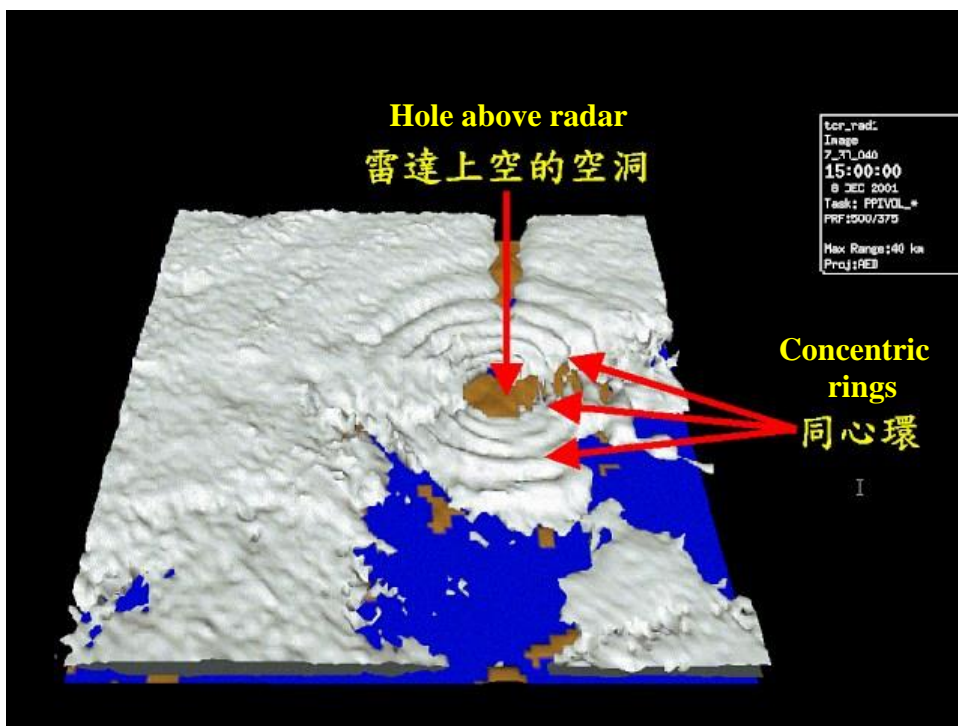
當天氣雷達的微波碰到雨區以外的物件時，微波會同樣地反射回來，該物件會出現在雷達圖上。這些便是**雜波**。除了山及建築物外，海亦能產生雜波。當海面風勢較大時，海浪較高，容易反射微波而產生海雜波。圖十七顯示二零零三年七月廿四日颱風伊布都橫過南中國海時，雷達出現的海雜波。



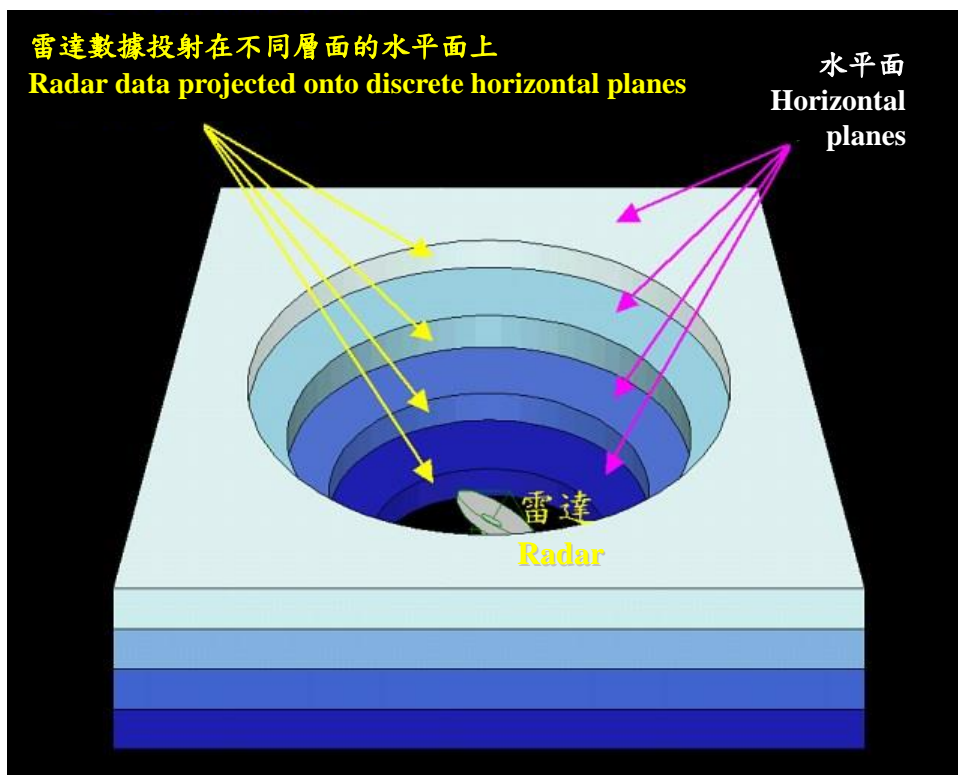
圖十七 二零零三年七月二十四日香港時間早上六時十七分颱風伊布都的圖像。香港南面海域出現海雜波。

3.4.4 立體圖出現的空洞和同心環的假視覺現象

立體天氣雷達圖像是結合天文台兩台天氣雷達數據製作而成。當單獨使用一台雷達的數據時，立體圖像上便會間中出現空洞和同心環(見圖十八)。這現象在本港被廣泛兩區所覆蓋時尤為明顯。空洞的出現是與雷達的操作有關。如圖四所示，雷達正上空的地方是沒有數據的。立體圖像上於是便出現一個空洞。同心環的出現是由於計算立體雷達資料時所造成的一種假視覺現象，當中涉及將雷達掃描所得的數據投射到不同層面的水平面上。由於最高仰角以上的地方沒有雷達資料，所以在雷達正上空的倒立圓錐體內是沒有數據的(圖四所示的黃色圓錐體)。當這沒有數據的地方投射到不同層面的水平面上，便會在個別平面上出現圓形的中空地區(見圖十九顯示的立體視角效果)。水平面的高度越高，圓形地區便越大。立體雷達圖像是利用這些投射在不同層面的水平面上雷達數據製作而成。由於各層上圓形地區的邊界看上去像梯級一樣，在立體雷達圖像上於是便出現像同心環的現象。



圖十八 二零零一年十二月八日下午三時的立體雷達圖像。圖中出現空洞和同心環。



圖十九 立體雷達圖像出現同心環的示意圖。

3.4.5 探測距離

天氣雷達能探測雨區的位置，但其有效的探測範圍是有所限制的。原因是這樣：天氣雷達發射微波脈衝後，便等待微波反射回來以計算出雨區的距離。這反射回來的微波脈衝必須在下一次發射微波脈衝前返回天氣雷達才有用，否則會誤被當為下一次發射微波脈衝的反射。因此，探測雨區的有效範圍(即**最大不模糊距離**)是受發射脈衝與脈衝之間的時間(**脈衝重覆時間**)所限制。脈衝重覆時間越大，最大不模糊距離便越大。

如果一個雨區位於最大不模糊距離以外，並且被天氣雷達探測到，天氣雷達會誤以為雨區位於更近的距離。雷達圖像中的雨區會出現在錯誤的地方上。這是名為**二次傳輸回波**。

3.4.6 速度範圍

多普勒天氣雷達的速度探測範圍是有所限制的。原來，多普勒天氣雷達並不是直接探測反射微波的頻率的偏移，而是量度接連的反射微波之間的所謂相位變化，從而得出頻率的偏移。利用這種測量頻率偏移的方法，令天氣雷達只能探測到有限度大小

的速度。這最大可探測的速度範圍名為**最大不模糊速度**。這最大不模糊速度與脈衝重覆時間成反比。脈衝重覆時間越大，最大不模糊速度便越大。

假若一個雨區位的徑向風超過了最大不模糊速度，天氣雷達會誤以為兩區有不同的速度。這現象叫**速度折疊**。事實上，圖十一顯示了速度折疊現象。你可找出來嗎？

3.4.7 多普勒兩難

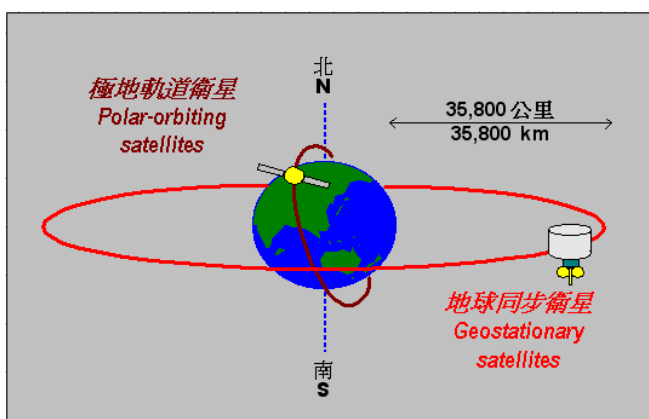
上述的最大不模糊距離和最大不模糊速度的出現，使多普勒天氣雷達可選取的脈衝重覆時間受到限制。若果增加脈衝重覆時間，最大不模糊距離便增加，但最大不模糊速度亦隨之減少。這兩難現象是叫**多普勒兩難**。要平衡最大不模糊距離和最大不模糊速度，便要小心選取脈衝重覆時間。

4. 氣象衛星的運作原理

4.1 甚麼是氣象衛星呢？

氣象衛星在地球上空遠處運行。它所攜帶的感應器指向地球，從而拍攝地球的鳥瞰圖。氣象衛星根據其軌跡可分為兩類：**地球同步氣象衛星**和**極地軌道氣象衛星**(圖二十)。

恰如其名，地球同步氣象衛星相對地球是靜止不動的。它環繞地球的速度與地球自轉的速度相同，固它在任何時刻均逗留在地球上同一地點的上空。這使它能 24 小時不間斷地捕捉同一地方的雲圖。它離地面約 35,800 公里，可拍攝到半個地球的影像。表一列出了一些現仍運行的地球同步氣象衛星。所有氣象衛星一起覆蓋了整個地球。



圖二十 地球同步氣象衛星和極地軌道氣象衛星的軌跡。

表一 地球同步氣象衛星

衛星	位置 (經度)	覆蓋範圍	操作衛星的國家/組織
GOES-9 (二零零三年中替代GMS-5)	155°E	西太平洋、東亞、澳洲	美國、日本
風雲-2B(FY-2B)	105°E	亞洲、印度洋、西太平洋、澳洲	中國
GOMS	76°E	亞洲、印度洋、東非、東歐	俄羅斯
INSAT	74°E	亞洲、印度洋、東非、東歐	印度
INDOEX	63°E	亞洲、印度洋、非洲、歐洲	歐洲氣象衛星中心
METEOSAT	0°E	東大西洋、歐洲、非洲	歐洲氣象衛星中心
GOES-E	75°W	北美、南美、大西洋	美國
GOES-W	135°W	東太平洋、北美	美國

極地軌道氣象衛星以大致南北方向環繞地球運行。它的軌跡離地面約數百公里。它們大部份一天內經過同一地點一兩次。由於較接近地球，它們每次只能拍攝到有限區域的雲圖。相對地球同步氣象衛星，極地軌道氣象衛星圖像的數目較少，範圍亦較小。但此類雲圖有一優點，就是雲圖的分辨率較高。表二列出了一些極地軌道氣象衛星。

表二 極地軌道氣象衛星

衛星	軌跡高度	操作衛星的國家	應用範疇
NOAA 系列	830-870 公里	美國	雲觀測
FY-1 系列	870 公里	中國	雲觀測
TRMM	403 公里	美國、日本	熱帶雨量觀測
QuikSCAT	803 公里	美國	海面風向風速觀測

在香港，我們可以接收到 GOES-9, 風雲-2B (FY-2B) 和美國 NOAA 系列等極地軌道氣象衛星的雲圖。

氣象衛星攜帶不同的感應器，每一感應器均有其特別作用。大部份氣象衛星是被動式遙感儀器，接收地球反射的太陽光和熱輻射。譬如，GOES-9 衛星攜帶了一些感應器來拍攝在可見光和紅外光頻道的雲圖。表三列出了這些頻道的特徵。

表三 GOES-9 衛星觀測頻道的特徵

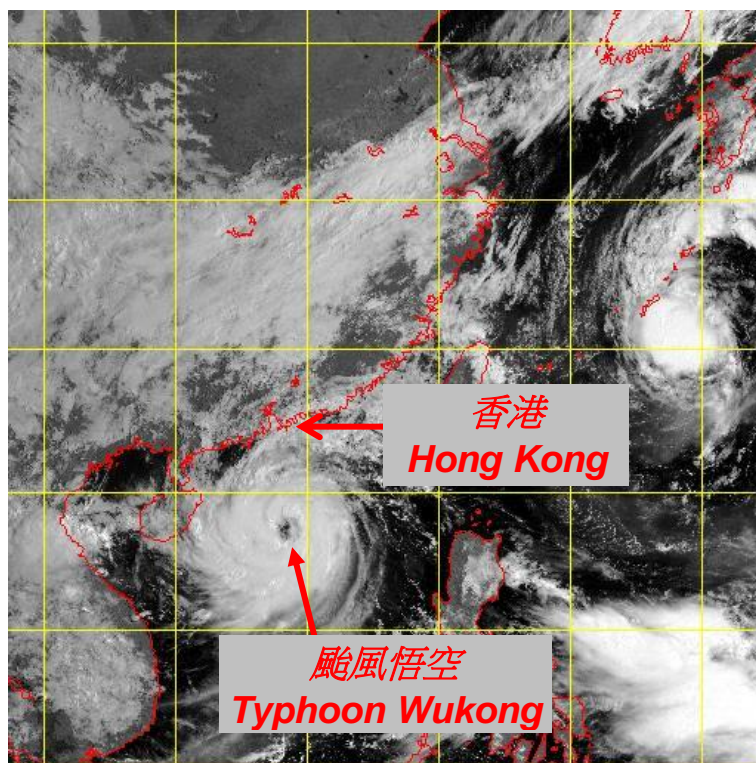
頻道	波長 (微米)	水平分辨率	觀測
VIS 可見光	0.55-0.75	1 公里	雲、冰和雪在日間的分佈
短波	3.80-4.00	4 公里	晚間的霧、山林大火
WV 水汽	6.50-7.00	8 公里	大氣高層的水汽
IR1 紅外光 1	10.20-11.20	4 公里	雲頂、海面溫度
IR2 紅外光 2	11.50-12.50	4 公里	雲頂、海面溫度、火山灰

4.2 衛星圖像的應用

最常見的衛星圖像包括可見光、紅外光和水汽通道的圖像。每類圖像各自顯示大氣的不同資料。以下我們利用 GMS-5 的圖像來討論衛星圖像的應用。

4.2.1 可見光衛星圖像

GMS-5 可見光衛星圖像的頻道介乎 0.55-0.90 微米。這些圖像記錄自雲和地球表面反射回來的可見光。深厚的雲團和雪的反射率較高，在圖中顯示成光亮的白色地方。沒有雲覆蓋的陸地和海面的反射率較低，在圖中顯示成暗灰色的地方。高雲和低雲的反射率相約，因此單靠可見光衛星圖像是難以區分它們的。圖二十一顯示二零零零年九月八日早上的可見光衛星圖像，當時颱風悟空位於南中國海北部。可看到圖中悟空圓形的風眼，悟空光亮白色的螺旋形雲帶亦清晰可見。

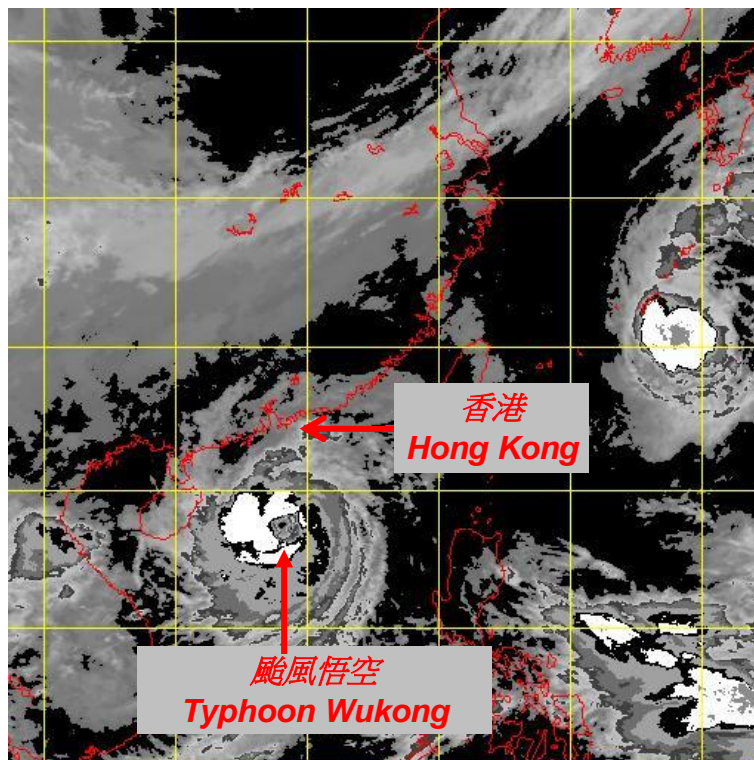


圖二十一 二零零零年十二月八日世界協調時 00:30 (香港時間上午 8:30) 的可見光圖像。圖中顯示颱風悟空位於南中國海北部，它那圓形的風眼和螺旋形的雲帶清晰可見。(此圖接收自日本氣象廳的 GMS-5)

4.2.2 紅外光衛星圖像

GMS-5 紅外光衛星圖像有兩個頻道，分別介乎 10.5-11.5 微米(IR1 圖像)和 11.5-12.5 微米(IR2 圖像)。圖像所錄得的紅外光是量度溫度的一種方式。大氣溫度隨高度增加而減少，高雲溫度較低，其發放的紅外光較少。基於這特點，紅外光圖像可用來分辨高雲和低雲。紅外光圖像亦可用來估計熱帶氣旋的強度的(稍後會有討論)，這對於監測熱帶氣旋強度的變化很有用。一個熱帶氣旋正在增強時，其中心的高雲增多，熱帶氣旋頂部的溫度變得較低。圖二十二是颱風悟空的紅外光圖像。圖中影像是經過處理的，深灰色及白色的地方溫度較低，約 -80°C 。中度灰色的地方溫度則較高。環繞悟

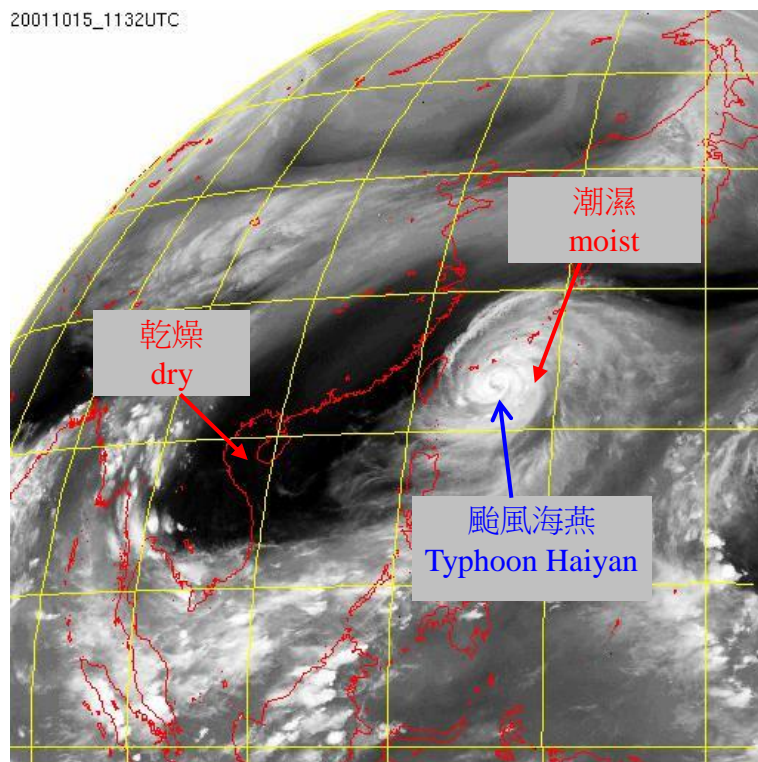
空中心的顏色正是深灰色及白色，這些低溫表示悟空已達至一定的強度。事實上，悟空當時是一個颱風。紅外光圖像 24 小時皆可捕捉得到，適合全天候監測熱帶氣旋的發展。



圖二十二 如圖二十一，但為紅外光圖像。圖中以不同灰階度表示雲的不同溫度。悟空風眼周圍深灰色及白色的地方表示溫度低至 -80°C ，顯示颱風已達至一定的強度。(此圖接收自日本氣象廳的 GMS-5)

4.2.3 水汽通道衛星圖像

這些圖像接收水汽(特別是高空的水汽)在 6.5-7.0 微米範圍發射的電磁波。若果大氣高層較潮濕，那裏的水汽所發射的電磁波被感應器所接收，在衛星圖像上顯得較光亮。反之，若果大氣高層較乾燥，自大氣中層的水汽所發射的電磁波便可傳至感應器，在衛星圖像上其顏色成暗灰色。因此，較深的顏色表示上層空氣較乾，較光亮的顏色表示大氣中高層較潮濕。圖二十三是二零零一年十月十五日國際協調時 11:32(香港時間下午 7:32)的水汽通道圖像。這顯示位於台灣以東的颱風海燕，其中心包含大量水汽。反之，華南地區和南中國海西北部中高層的水汽稀少，使得那裏顏色較深。



圖二十三 二零零一年十月十五日世界協調時 11:32 (香港時間下午 7:32) 的水汽通道圖像。位於台灣以東颱風海燕的中心含大量的水汽(呈光亮的白色)。同時，華南地區和南中國海西北部的的水汽稀少(呈深灰至黑色)。(此圖接收自日本氣象廳的 GMS-5)

4.3 氣象衛星的限制

4.3.1 可見光衛星圖像

可見光衛星圖像是捕捉自地球反射的可見光。這些可見光源自太陽。因此，晚間並沒有可見光衛星圖像。如前所述，高雲和低雲的反射率相約，在可見光衛星圖像上出現的顏色相近，因此可見光衛星圖像是難以用來區分高雲和低雲的。

4.3.2 紅外光衛星圖像

一般來說，紅外光衛星圖像的分辨率較可見光衛星圖像低(參看表三)。因此，紅外光衛星圖像未必能顯示如可見光衛星圖像所顯示的雨帶細緻結構。

4.3.3 水汽通道衛星圖像

由於大氣層非常強烈地吸收水汽頻道的電磁波，因此在大氣低層的水汽所發射的電磁波還未到達衛星前已被吸收掉。水汽通道衛星圖像未能顯示大氣低層的水汽含量。