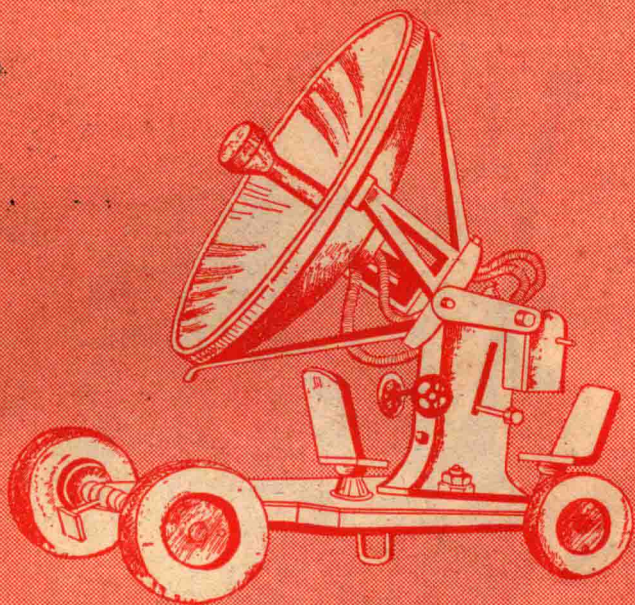




国防科学小丛书

雷达

科学普及出版社

雷 达

陶 望 平

科学普及出版社

1957年·北京

目 次

雷达的工作概念和發現簡史	1
一、雷达的工作概念	1
二、雷达發現簡史	3
雷达的原理和結構	5
一、雷达的測向原理	5
二、雷达的測距原理	7
三、雷达站的結構和外形	13
雷达在第二次世界大战中的应用	17
一、雷达在防空上的应用	18
二、雷达在海战上的应用	20
三、雷达在歼灭潜艇上的应用	22
四、雷达在控制高射炮上的应用	24
五、雷达在轟炸上的应用	25
六、雷达在傘兵部队中的应用	30
雷达的干扰和反干扰	31
一、雷达偵察机	31
二、干扰	31
三、反干扰	33
雷达和導彈控制	33
雷达和近代国防	38

雷达的工作概念和發現簡史

一、雷达的工作概念

雷达在科学上更正确的名称是“無線电定位”，無線电定位的意义是利用無線电波測定目标（飞机、船艦和陆上的工厂房屋及坦克等）的准确位置。怎样利用無線电波去測定目标的准确位置呢？这可以用人类說話产生回声作例子來說明。

住在山里的人，如果向远处的山峰大吼一声。那么在很短的时间以后，便能听到从远处傳出的較尖而弱的吼叫声，这就是回声。回声是声波的反射現象，喊出的声音以每秒 330 公尺的速度向山峰前进，等到碰着山峰，就不能繼續前进，只有换个相反的方向，朝着原处反射回来。如果山峰的距离較远，声波要行經較長的路程才能碰到它，这时回声就来得晚；如果山峰的距离較近，声波行經較短的路程就能碰到它，这时回声就来得快。如果用精确的計时仪器，测量从發声到听见回声的这一段時間，例如是若干秒，然后乘以声波的傳播速度每秒 330 公尺，就可以求出發声地点和山峰之間的来回距离。例如一个人向远处山峰吼叫一声后，在12秒后听到了回声。那么声波所走过的总路程就是 12 乘 330，即 3,960 公尺，这个数目的一半即 1,980 公尺就是發声地点和山峰之間的距离。

雷达用的原理和声波反射相同，不过雷达發射的是無線电波，由計算發射波和回波一来一去的时间，就能确定远在数百公里以外的目标位置。

在自然界中某些动物，利用波的反射来偵察运动前方有無障碍物或其他动物的存在，已有几百万年的历史了。例如蝙蝠，它在白天睡覺，而在夜間出来飞行和寻找食物，很多人認為蝙蝠的

眼睛能够在夜間覓物，但事实上却不是这样。在 200 年以前，有一位科学家曾拿蝙蝠作过試驗，他使蝙蝠失去视觉和嗅觉，讓它在一間安着很多綫的、綫上挂着鈴子的房間里飞翔；蝙蝠却一次也沒有碰着綫，因而也沒有一个鈴子响动。这个秘密直到1942年，才被生物学家所發現。蝙蝠所以能够安全飞行，并不是靠它的眼睛，而是靠它的嘴巴和耳朵。原来蝙蝠在飞行时，嘴里發出頻率每秒为25,000—70,000次振动的超声波。这种超声波是人类無法听到的，听觉最好的人也只能听到頻率每秒为16—20,000次振动的声波，但蝙蝠却能收听到超声波。蝙蝠在飞行时的叫喊不是連續的，而是短短的叫一下，停一下，再叫一下，每秒共叫 30 次，在靠近障碍物时約叫 60 次。一連串的叫喊声，遇到障碍物，便被反射回来，蝙蝠憑它的經驗，就可知道障碍物的方向和距离。圖 1 所示就是蝙蝠利用超声波測量障碍物的示意圖。

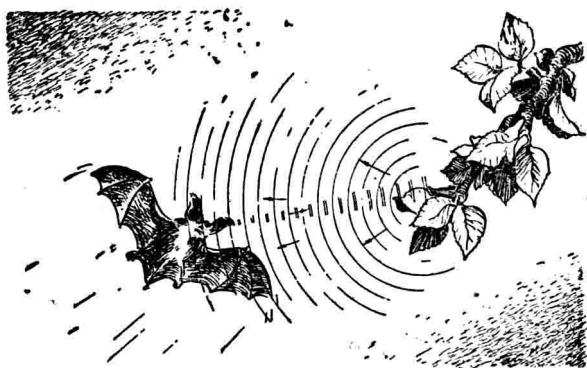


圖 1 蝙蝠利用超声波測量障碍物。

在不久以前，生物学家从埃及的尼罗河中發現一种長約1公尺的長鼻魚，当它在河底淤泥中無憂無慮地寻找食物时，任何一次总是及时地發覺迫近的敌人，無論它是从前方、从側面或者从后面出現。原来長鼻魚尾部能發出一种無綫电波，这是由于体内所产生的放电現象所引起的，每分鐘能間歇地發射 100 次。發出的無

綫电波碰到周圍的物体被反射回来，便为長鼻魚的脊鰭底部的一個特殊器官所吸收。因此，長鼻魚能够在一定的距离內觉察到凶惡敌人的接近，并且及时地躲开它。長鼻魚發射

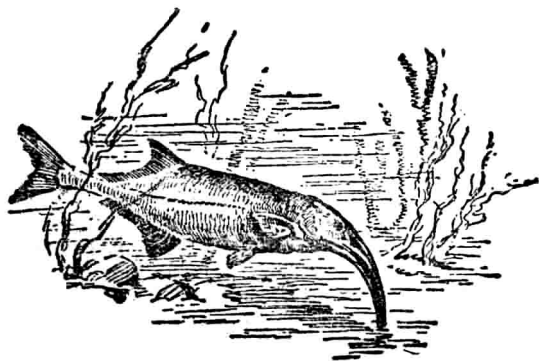


圖 2 尼罗河的長鼻魚。

的是無綫电波，和蝙蝠發射的超声波在本質上是不同的，从工作原理上来說就更接近于雷达。圖 2 所示为長鼻魚的外形。

二、雷达發現簡史

人类利用無綫电波去測量目标，开始于第二次世界大战前數年，約在1935—1936年間。但是利用無綫电波的反射来發現金屬目标，早在 60 年左右以前已为偉大的俄罗斯無綫电發明家波波夫所發現。

1864年英国天才的物理学家麦克斯威尔，借助于数学的計算，証明無綫电波的存在，并計算出它具有和光速差不多相等的速度，因此，麦克斯威尔提出一个論点，光也是無綫电波的一种。光既然能反射、聚焦，那么無綫电波也应该具有同样的特性。

1888年，德国科学家赫芝利用电的振盪放电，人为地得到了無綫电波。他証明了这种無綫电波和光一样能傳播和反射。但是他自己却認為利用它来作通訊和其他用途是不可能的。直到1895年，波波夫才發明了利用無綫电波傳送远距离訊号的机件，并于1897年在波罗的海上进行試驗时，發現了無綫电波在兵艦上的反

射現象。他曾經預言過：這種現象可以用來發現肉眼所看不到的目標。像這樣的現象，25年後才為其他國家的科學家所發現。因此波波夫不僅是無線電的發明人，而且也是雷達技術的預見者。



圖 3 無線電發明家
和雷達技術預
見者 A. G. 波
波夫。

在第一次世界大戰後，由於飛機的速度逐漸增加，在防空上急需在距離更遠時就能發現敵機的工具，這就迫使許多國家的科學家在1930年後加緊地研究這個問題。雷達就在這樣的時代背景下誕生的。蘇聯在1936—1937年開始正式製造雷達機件，這一工作是在科學家 Ю. Б. 哥別扎里伐領導下所完成的。英國在1935年由物理學家華特遜——華特試驗成功雷達，實際裝置和在國防上試用是在1936—1938年正式開始的。美國軍事機關試驗成功雷達是在1936年，而正式應用是在1940年。此外在德國、法國、意大利和

日本也有一些類似的試驗，但到戰爭開始時還未正式採用。雷達在各國的出現當時都是嚴守秘密的。

說到雷達發展的历史，不能不提到雷達中所用的特殊電子管——磁控管的重要性。自1935—1940年所研究和製造出的雷達，它的波長多在10米到50厘米之間。這種雷達一則造得很大，只適於裝置在地上或船上，不適於裝置在飛機上；二則測量誤差比較大，只能作遠距離發現目標用，不能用作近距離指引炮火用。要使雷達造得小和輕，同時能得到比較高的準確性，只有採用波長為3—10厘米的雷達才有可能。要產生這樣短波長的無線電波，只有利用新的電子管——磁控管才能做到。自從雷達採用了磁控管之後，它的測量準確性和軍事要求的性能大大地改善了，因而也就成為近代重要的國防偵察武器之一。磁控管早在1936年由蘇聯工程師 H. Ф. 亞歷克山也夫和 D. E. 馬拉諾夫所發

明，而英國在1940年才出現，美國到1940年後，才由英國送去圖樣開始製造。

雷達是無線電技術和電子科學高度發展的產物，一架雷達一般要用50—500個電子管，許多國家的科學家對其中所採用的線路都有過相當的貢獻。它和電視技術、無線電波傳播理論、超短波技術、工程中的自動控制技術等都有不可分割的關係。雷達發展的历史和原子能發現的历史有很多相似處，也是集合世界上許多科學家的創造性勞動而實現的，因此不能說是某一個國家的科學家所發明的。過去英國宣傳雷達是他們發明的，這是不符合事實的，連美國也不承認。只是因為英國參加第二次世界大戰較早，同時本土離德國近，對於防止德國空軍轟炸的要求更迫切，因此雷達在軍事上的正式應用在時間上較早一步而已。

雷達的原理和結構

一、雷達的測向原理

在上面已經簡單地介紹了雷達利用無線電波來發現目標，同時根據回波的到來時間定出距離的基本原則。本節主要是來介紹一下雷達測定目標方向的原理。

要測量物體在空間的位置，就必須指出它在空間的座標。在圖4中，用二個角度表示目標的方向，一個像地圖似的以北面為標準，飛機的方向與此方向間的夾角稱為方位角；另外一個是飛機的斜距與水平距離間的夾角稱為仰角。

用雷達測量目標方位角和仰角的方法有好幾種，其中最常用的一種是和探照燈測敵機位置的方法相同。探照燈把光聚在一起，晚間照住天空的飛機時，探照燈光所指的方向就是目標的方向。

探照燈有一個拋物面反射器，雷達和探照燈一樣，天綫也有一個反射器，有的是一个平面，有的是一个拋物面，在反射器的

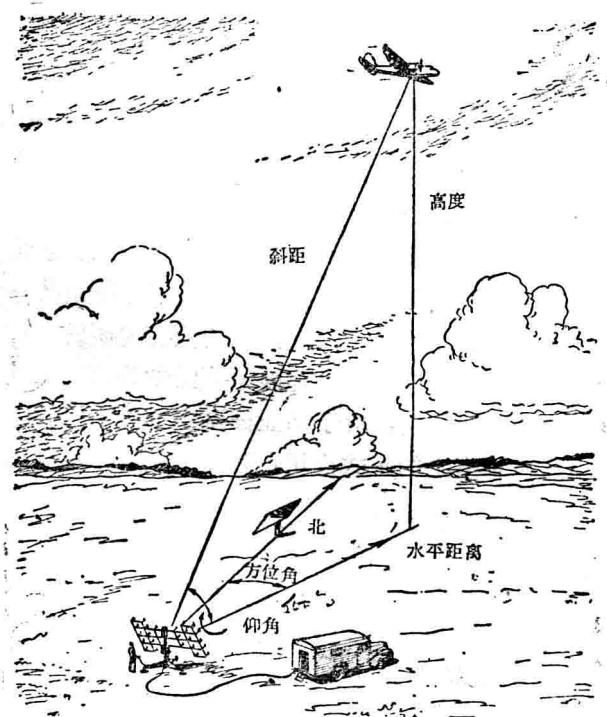


圖 4 雷达确定目标的方位角和仰角。

前面或焦点上，裝有無線電波的發射源，無線電波由雷达机件产生后从这里發射出来，投射到反射器上，由反射器聚成一个細小的波束再照射到天空中去。

在無線電技术中有这样一个定律，反射器的面积比無線電波的波長愈大，获得的波束就愈細，波束細了以后，就能利用探照灯的原理很正确地吧敌人的目标位置确定下来；如果波束粗了，天綫即使移动了一些角度，目标还是一样能被看見，这样就不能正确地測量出目标的位置来。在雷达技术中为了要正确地測量目标，同时使天綫造得更小，便于把雷达站裝置在飞机上和汽車

上，就必須採用波長很短的無線電波，這就是為什麼雷達一般採用超短波的主要原因之一。

此外，還有二個理由在雷達技術中必須採用超短波。一個理由是目標的反射強弱和波長有關，在目標大小一定時，波長愈短，反射愈強。一般探測的目標，如船艦、飛機和浮出水面的潛水艇的形態都是不算大的，要由它們引起很强的無線電反射回波，就必須使用波長很短的電波才行；如果使用波長較長的電波，那麼就會使回波減弱，有時甚至收不到。另一個必須採用超短波的理由是：在離地面約 50 公里到 500 公里處有着密集的电子組成的游離層，一般無線電的長短波都會受到這些游離層的反射，只有波長很短的無線電波才能透過這些游離層，不受反射的影響。在雷達工作中是利用發射電波和由目標回來的反射回波的直線傳播，不希望電波經過游離層時再反射一下，因為這樣會產生測量誤差，使測得目標的距離和方向都不正確了。目前雷達所用的超短波波長，由 10 米到 1 厘米之間。

雷達為了發現目標，天綫應當像探照燈尋找目標時一樣，要對着天空掃來掃去。掃描的方式或者是圓形、或者是螺旋形、或者是圓錐形，有時甚至左右搖擺，視不同的用途而定。雷達的天綫不但具有定向的作用，而且能在仰角和方位角的方向轉動，這是和一般無線電廣播或通訊的天綫完全不同的。圖 5 表示各種式樣的雷達天綫，每個天綫都包括反射器和發射無線電波裝置二個部分。雷達站的發射機和接收機安裝在一起，因此在極大多數的情況下，可利用同一根天綫，既作為發射之用，也作為接收之用。

二、雷達的測距原理

現在進一步研究雷達究竟採用什麼方法去測量發射電波和反射回波的時間。在雷達中，為了要分清發射電波和反射回波，發射電波必須是不連續的，即在每次發出電波以後，發射暫時中斷

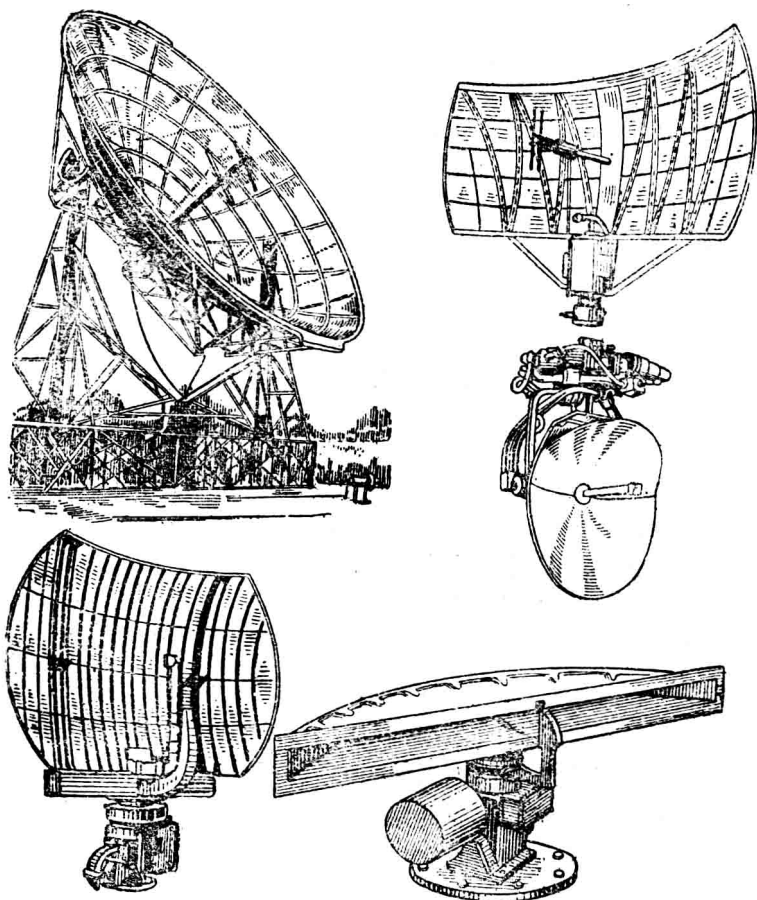


圖 5 各種雷達天綫的結構圖。

一个时期，在这時間內雷達进行反射回波的接收，然后再重复地連續不断地再發射和再中断。这种不連續的發射电波，在雷達技术上就叫做脉冲。除了少数有特殊用途的雷達不采取脉冲的方法外，一般的雷達必須采用脉冲的方法。

采用脉冲方法还有一个好处，功率可以集中在一个很短的时

間發射出去。例如每个脉冲的时间是 1 微秒（1 微秒是 1 秒鐘的百万分之一），而停歇的时间是 1,000 微秒，那么即使每个脉冲的功率可以达到 10,000 瓦特，而平均功率也只有 $10,000 \times \frac{1}{1000} = 10$ 瓦，这个功率是很小的。平均功率的减少，可以使产生無綫电波的电子管的体积縮小，而且需要供給的能量也大大地减少了，这对于帶在飞机或汽車上的雷达站尤其重要。

在雷达站中怎样去測定發射电波和反射回波的时间呢？現在用圖 6 來說明这一点。圖中丙丁綫的長短代表時間，左端丙点代表开始發射脉冲（它的形狀用矩形甲来代表）的时间，乙点代表从目标反射回来的脉冲（它的形狀用矩形乙来代表）时间，这两个脉冲之間的时间間隔用 t 来代表。如果回波到得早一些，那么乙的位置就要向左移，时间 t 就短一些；否則乙的位置就要向右移，时间 t 就長一些。时间 t 代表無綫电脉冲波一去一回的时间，假定雷达和目标間的距离是 S 米，同时已知無綫电波在空中前进的速度是固定的即 $C = 300,000$ 公里/秒，因为实际的距离应为电磁波所行走距离的一半（电波是一去一回的），于是我們可以得到下面的关系：

$$S = \frac{Ct}{2}$$

在雷达技术中最重要的就是把这个 t 精确地量出来，然后再換算出距离。由于这个時間太短，一般不能用鐘表或其他的方法去測量。因此在雷达中利用了电子射綫管来完成这个任务。

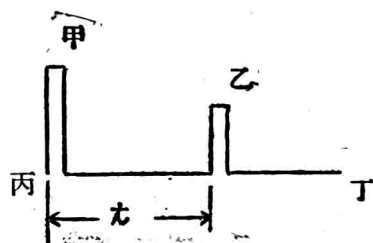


圖 6 發射电波和反射回波。

这个時間短到怎样一个程度，可以用下面的例子來說明，如果我們希望能够測到 200 公里以外的敌机，那么時間 $t = \frac{2S}{C} =$

$\frac{2 \times 200}{300,000} = \frac{1}{750}$ 秒，这样短的时间用鐘表測量是不可能的，但是利用电子射綫管代替鐘表測量这样短的和比这更短的时间，那却是一件比較容易的事情。在雷达中利用电子射綫管的裝置叫做指示器。

电子射綫管的主要部分裝在一个漏斗形的、眞空的密封玻璃管中。寬闊的管底用作螢光幕，上面塗有螢質發光層，当雷达站發現目标时，电子打在幕上，会显现出标記来。

电子射綫管的結構如圖 7 所示，在狹窄一面的底部裝有由灯絲、控制極、陰極和陽極組成的所謂电子槍。当灯絲有电流通过时，所产生的热量把陰極燒热，热到一定温度后会發射出电子，飞向寬闊的管底——螢光幕。控制極和陽極对电子有聚焦和加速的作用，使电子聚成小的射束不向四方飞散。聚焦裝置对于电子的作用就像光学透鏡对于光綫的作用一样，它把电子聚在螢光幕的一点上。

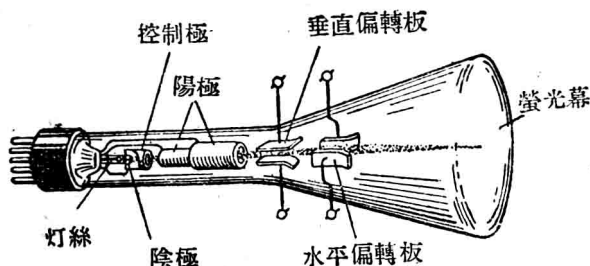


圖 7 电子射綫管的構造。

当每个电子以極高的速度轟击在螢光幕上时，电子射到的地方就会出现螢光，随着所塗螢光質成分的不同，亮光可能是白色的、綠色的、棕色的、藍色的或黃色的等。由于电子的質量很輕和运动十分灵活，所以它們能够对加在二对管内偏轉板上的电压变化起特別快的响应。这二对偏轉板是用来控制管内电子束的移

動的，其中一對是垂直的，另一對是水平的。假如垂直的一對中上面一塊帶正電，下面一塊帶負電，那麼由於電子是帶負電的微粒，它們在這對偏轉板中間飛過時，就被上面的一塊板所吸引，而被下面一塊板所排斥，結果電子束就向上偏轉，因之射到螢光幕上的亮點也升高。另一對水平偏轉板也會使電子偏轉，不過它使電子沿水平方向偏轉。

在水平偏轉板上，加有迅速變化的在時間上可以精確控制的電壓，這電壓使電子從左打到右，然後迅速地回到左面再向右打，結果在螢光幕上亮點成為一根水平的，通過圓心的直線。由於螢光質在電子打擊後仍能在相當短的時間內發亮，因此我們所看見的是一根連續的直線，不是移動的一個亮點。

亮點以固定的速度在螢光屏上移動。它從左到右的全部路程所需時間是可以準確地加以控制並預先知道的。假如將整個路程分為若干相等的部分，就能利用這來精確地測量出時間。

電子射綫管在垂直方向上的移動由另一對垂直偏轉板所控制。雷達接收機收到的訊號電壓在放大後加在這一對偏轉板上。

電子射綫管的工作和雷達站其他各部分的工作是嚴格地配合著的。每一次脈沖發射時，亮點就開始從螢光幕上的左端向右端移動。發出的脈沖通過接收機加到電子射綫管垂直偏轉板上，使電子在垂直方向上發生偏移，結果在螢光幕上的亮點就顯著地向上跳動一下，螢光幕的左端出現一個發光的尖峰，這表示有無線電脈沖已發射到空間去了。電子束向上跳動一下後仍繼續從左向右移動。它跑到右邊的終點後就突然地折回到左端，這時雷達站再發出下一個無線電脈沖波。在1秒鐘內，雷達站往往發出几百到几千個無線電脈沖波，而亮點也重複的移動這樣多的次數。我們在螢光幕上所看見的就是連續產生着的亮的綫。

如果雷達站附近沒有任何障礙物的話，螢光幕上就只出現一個尖峰，這就是發射的無線電脈沖的“像”。假如脈沖碰着了目標

物，那么就有反射回波，这个波接收后作用于运动着的电子，在螢光幕上就出現第二个發光的尖峰，这就是無綫电回波的“像”。由于螢光幕上整个綫的長度所代表的时间是已經知道的，那么这二个訊号之間的时间也可以由兩個尖峰的距离按比例地計算出来，圖 8 表示雷达站指示器上实际所看到的像。例如綫的总長度代表 $1/400$ 秒的时间，二个脉冲間の間隔时间按相距長度的比例应为 $1/500$ 秒，那么目标距雷达站的距离 $S = \frac{1}{2} Ct = \frac{1}{2} \times 300,000 \times \frac{1}{500} = 300$ 公里，便可很快地求出来。

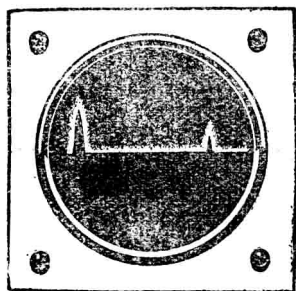


圖 8 雷达站指示器螢光幕上的圖像。

上面所談的指示器是許多方法中最簡單的一種方法，事實上指示器类型有十多种。有的不仅显示距离，而且可以显示方位角或仰角，有的同时显示方位角和仰角，还有一种能够直接表示出目标的高度。

有一种用途相当廣闊的平面位置指示器，在它上面能看到以雷达站为中心的像地圖似的圖形。螢光幕的中心就是雷达站的所在地。亮点由中心順半徑向外作直綫移动，这一根直綫不是固定在一个位置上，而是随着天綫的指向移动。当天綫作圓轉动时，螢光幕的像就是由这个中心到边际的一根根綫所組成的，好像陽傘由傘心到傘边的許多骨架所組成的圓形一样。發現目标时，例如金屬物、土地及房屋时，就会产生反射，在螢光幕上就会發現亮点。海面或水面由于表面十分光滑，像鏡子一样，把無綫电波反射到另一个方向去，由入射方向反射回来的回波是很少的，因此在螢光幕上就显现不出什么像。圖 9（見中縫插頁）所示为一个海灣的实际照片（左下方）和雷达平面位置指示器的照片（右上方）。在平面位置指示器上海面和河流沒有白色的反射亮光，

但海岸和房屋反射很强，因此呈现出很显著的白色亮光。陆地上的草地或田地反射也很弱，因此也呈现不出白色的反射亮光。有经验的观察员往往能从平面位置指示器上区别地形和海面上的船舶。圖10（見中縫插頁）所示左面二个照片是在下雨或有云雾的时候拍摄的，虽然目标可见度很差，同时飞机下面的地形非常复杂，可是在平面位置指示器上仍然能清晰地看出一切。例如在右下面的一张图像上，在漆黑的海岸背景上能看清楚艦队的位置。平面位置指示器在和平事业和国防事业上有十分广阔的用途。

三、雷达站的結構和外形

雷达站的結構如圖11所示，一般包括有天綫、天綫开关、發射机、脉冲發生器、接收机、指示器和电源等共七个部分。

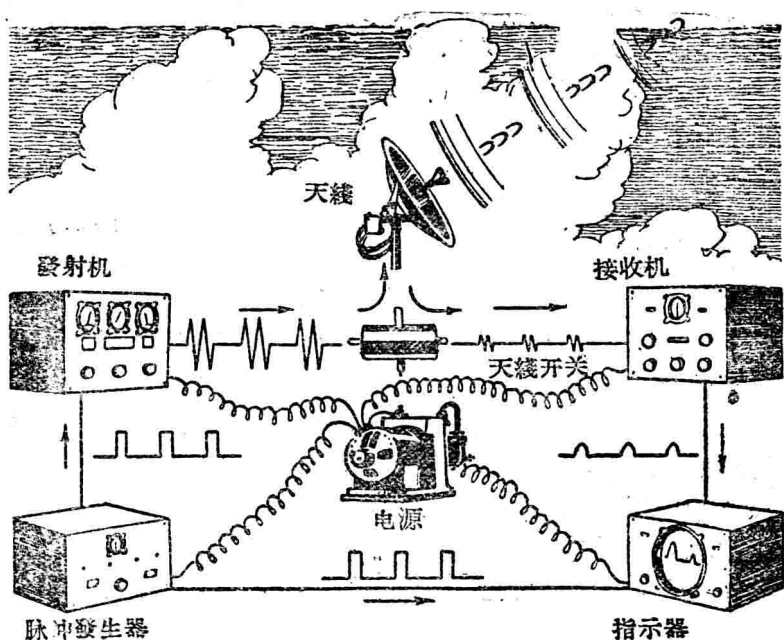


圖 11 雷达站的結構。

根据雷达的工作原理，首先需要从天綫發出脉冲的無綫電波，因此每一个雷达站必須有一个發射机和一个脉冲發生器。發射机产生超短波的振盪，必須是不連續的，而且是按照脉冲發生器所規定的時間發射脉冲的。由天綫进入的反射回波十分微弱，因此，雷达站必須有一个接收机將它放大。此外，由于雷达站利用同一天綫作为發射和接收之用，因此必須裝置一个天綫开关。它的用处是在發射时，把發射机和天綫接通；而在接收时，把接收机和天綫接通。指示器內裝有电子射綫管，用来观察發射波和回波，或观察代表目标位置的其他圖形。天綫按照一定規則运动，以便發現和观察目标。發電裝置是供給雷达站所有各部分机件用的电源。

圖12（見中縫插頁）所示是陆地上偵察飞机或指揮探照灯用的防空雷达站。这种雷达站的体积非常大，重量达数吨。它測量目标的最大距离是36公里左右。这种雷达站在工作时有三人在操縱，一人測量距离；一人測量方位角；另一人測量仰角。裝置天綫的鉄梁除了能对方位角作360度旋轉外，并可在仰角的方向上作79度的旋轉。这种雷达站用的波長在1.4米左右。由于它很笨重和准确度不高，除了在第二次世界大战初期曾經大量采用外，現在已不采用了。

圖13（見中縫插頁）是飞机上用的瞄准雷达。它的重量很輕，只有106公斤，天綫也很小，像洗臉盆那么大，裝在飞机的炸彈架子上。它能够在80公里以內發現海面上的敌艦，12公里以內發現敌人的轟炸机。

圖14是探照灯雷达，我国抗美援朝的志願軍和人民解放軍的防空部队都曾大量地采用过它。在探照灯上裝有天綫六根，最上面二根是發射天綫（也有發射天綫只有一根的），下面是四根接收天綫，它的偵察距离在15公里以上。当雷达沒有搜索到敌机以前，不必先把探照灯光綫射出，以免使敌人發覺，反而暴露自