

雷 达 浅 说

中国科学院
电子学研究所

63

第一章 概 說

1. 从无线电到雷达

无线电在現在已成为大家都很熟悉的东西了，可是提起它的歷史來，却也并不太長。大約在一百年以前，英國科学家麥克斯韋將前人的發現加以綜合，首先創立了电磁波的理論。他肯定了電場和磁場間相互联系不可分割的統一关系。在理論上証明了：变动的電場必然產生磁場，而变动的磁場也必然產生電場。这种相互联系的電場和磁場構成了所謂“电磁波”，根据他用数学方程式的推導，电磁波有向外傳播的性能，它的速度又非常接近光速。因此，他得出結論說“光”本身只是电磁波的一种特殊形式，并用自己的理論說明了当时众所周知的許多有关光波傳播的物理現象。这个奠定了近世无线电波傳播現象的理論一直到十九世紀末叶才受到了科学家們的重視，推广到實踐中去。

1888年，德國科学家赫芝用电的振盪放电，人为地得到了电磁波。他証明这种电磁波确实和光一样能够傳播、折射和極化，但他沒有对电磁波作更進一步的研究。赫芝以后，也有很多科学家重复过这个實驗，可是誰也沒有能做成功一种可以远距离傳送信号的机件。直到1895年偉大的俄國学者亞歷山大·斯捷潘諾維奇·波波夫，才發明了利用电磁波傳送远距离信号的机件。



圖 1. 無線電發明家波波夫

1895年5月7日，波波夫在彼得堡俄罗斯物理化学学会、物理学分会上發表了“論金屬粉末与电振盪的关系”的报告，并实地表演了世界上第一架無線电接收机。当时他歉遜地称自己的仪器为“雷暴指示器”。他在結束报告时还預言說，如果將此仪器繼續改進，只要獲得有充份能量的电振盪源泉，以產生強烈的电磁波，就可以用來远距离傳送信号。

1896年3月24日，波波夫再一次給彼得堡科学家們作演講，并表演了世界上第一次無線电报通信，傳送距离为250公尺。此后，經波波夫的不断改進，到1900年通信距离就已增加到47公

里。那时并利用无线电通信，抢救了在芬蘭灣中触礁的波罗的海艦队的軍艦。

在无线电發展初期，无线电台是非常簡陋和笨重的。最初的發射机用电火花來產生无线电波，这种發射机的重大缺点是相互之間干擾非常厉害。后来就出现了电弧式發射机及特殊設計的高頻發电机，但这种型式的无线电台只能用来傳遞电报，而不能用来傳遞声音。直到电子管出现以后，情况就不同了，这是一个划时代的發明。它排挤了所有老式的發射机，并为无线电话通信開闢了道路。原先旧式的發射机的工作波长只限于長波和中波的范围內，而随着电子管的出现以及对于无线电波傳播方面深入研究所獲得的成果，我們便有可能掌握和利用短波、超短波甚至公分波和公厘波。在接收技术方面，电子管檢波器也有效地代替了最初的粉末檢波器。有了电子管，可靠的无线电通信，广播，傳真，电视以及雷达等设备才得以实现。

随着无线电技术的飛躍發展，在第二次世界大战期間出现了威力强大的新式武器——雷达。雷达原理的創始人就是无线电發明家波波夫。早在1897年，波波夫和他的助手雷布金在克倫斯塔特港進行增加无线电通信距离的實驗时，發現了无线电波在船舶上的反射現象。他預言道：这种現象可用来發現肉眼所不能看到的目标。波波夫畢生的全部精力，都用于改進他剛發明的无线电通信方法，因此沒有時間对无线电波的反射現象作更進一步的研究。直到后来，在高頻振盪和傳輸問題解决后，雷达才成为现实。

2. 从聲波的反射現象說起

在日常生活中，声音和光綫的反射現象是大家所熟悉的。光綫照在鏡子上，会被鏡子反射。月亮本身不会發光，但是我們在晚上可以看見明亮的月亮，因为月亮能反射射照在它上面的太陽光。光綫射在我們四周的物体上时，就被物体反射出來，投入我們的眼里，于是我們就能看見物体。

声波也有同样的現象。如果你面对着障礙物大喊一声，那末声波到达障礙物后，就被反射回來，不久你就听到了回声。在这一个簡單的實驗中，声波从波源——即你叫喊的地方，跑向障礙物，再由障礙物跑回波源，也就是說声波在波源和障礙物之間的这段距离上來回跑了一次。声波傳播的速度我們知道是每秒鐘330公尺。如果你用停表將發出声音和听到回声的时间（ t ）記錄下來，則障礙物离波源的距离即可用下式算出：

$$\text{距离} = 330 \times \frac{t}{2} \text{ (公尺)}$$

例如从發出声音到听见回声間相隔的时间 t 为1.6秒，距离即为264公尺。

有一种动物名叫蝙蝠，它在白天睡覺，而在太陽落山以后才飛出來找尋食物。从前人們曾誤認為它的眼睛怕光，以为它在夜里可以看見东西。其实不然，直到1942年，生物学家們才發現了它的秘密。蝙蝠在夜里能够安全飛行，不会碰到樹枝或房屋，并不是靠它的眼睛，而是靠它的嘴巴和耳朵。原來蝙蝠在飛行时，嘴巴里發出頻率較高的超声波，即每秒鐘25000—70000次的振动。这种超声波人类是无法听見的，最灵敏的人耳

只能对16—20000次的振动產生听觉，一般人在15000次以上就听不見了，但是蝙蝠的那对大耳朵却能听见。蝙蝠在飛出去以前，每秒鐘約叫十次，飛行时約叫三十次，在靠近障碍物时約叫六十次。一連串的叫喊声遇到障碍物后即被反射回来，离障碍物愈近，回声返回得愈快，蝙蝠憑它的經驗就可知道障碍物的距离和方向。此外，由于超声波較易反射，甚至金屬絲也能引起反射，所以蝙蝠能很巧妙地繞过樹叶和电綫，还能靠回声來捕捉小虫。

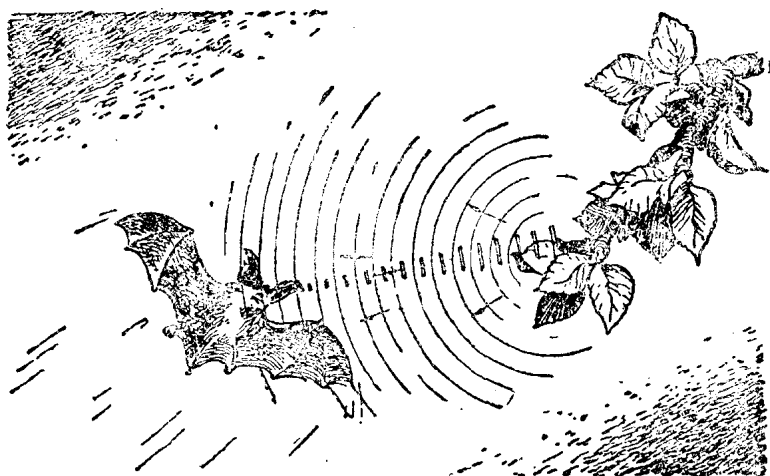


圖 2. 蝙蝠利用超声波測量目标

人們在知道了超声波能良好地被反射的現象后，創造了回声探測仪。回声探測仪可用來測量海的深度，預告前面的冰山，發現海底的暗礁和潛水艇。超声波遇到魚羣时也会反射，所以在捕魚事業中也有它的应用。此外，回声探測仪在工業上还能用來檢查金屬制品和金屬零件內的缺陷，如裂縫、砂眼等。

3. 雷达是什么？

利用声波來測距，在很多方面是不能令人滿意的。聲音傳播的速度太慢。測量最深的海（8—10公里）時，回聲要等11—14秒鐘才可收到，如果用回聲探測儀來搜索移動的目標，而目標物的速度又與聲音傳播的速度不相上下時，就會獲得毫無意義的結果。此外，聲波的傳播易受天氣的影響，大風能改變聲波傳播的方向。在軍事上，聲波難以保守秘密，而且外來雜音的干擾也大。雖然光波傳播的速度遠較聲波為快，但光波不能保守秘密，且容易被雲霧所阻擋，所以也沒有實用上的價值。

無線電波，與光波一樣，具有在障礙物上反射的特性，因此科學家們想出了用無線電波來達到測定目標物距離的目的。它的好處是：速度和光一樣，但能保密，不受天氣影響，並能穿透雲霧。此外還可以將無線電波的能量集中在一個方向發射出去以達到定向目的。“雷達”二字是外文的譯音，原文的意思是利用無線電波來測定物體的距離和方向，所以也可稱為“無線電定位”。

雷達測定目標物的方法和蝙蝠所用的方法相象，就是在觀測地點用特制的雷達發射機，依靠天綫的定向作用，向某一方向發出波長極短的無線電波，這種電波在前進的道路上遇見障礙物時就被反射，反射波的一部分到達出發點而為雷達接收機所接收。知道了無線電波傳播的速度（ 3×10^8 公尺）和從發射電波到接收回波中間相隔的時間（ t ），那末距離（ D ）就不難算出了；

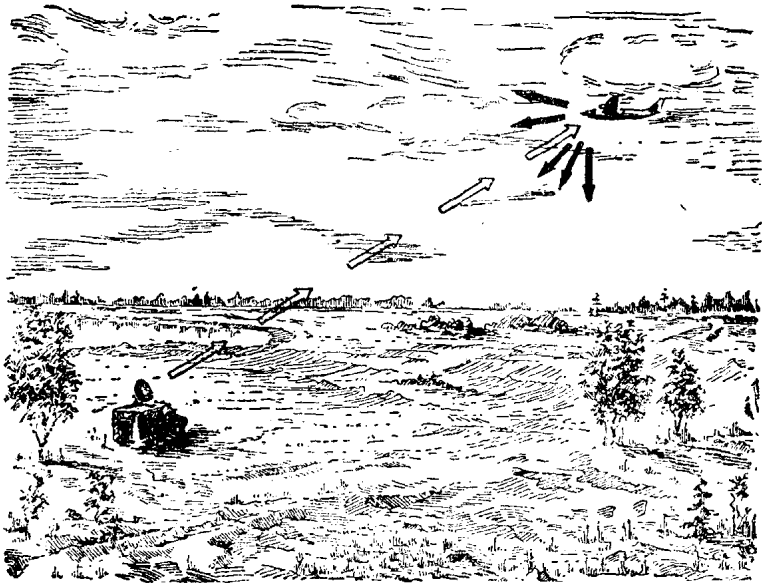


圖 3. 雷达利用无綫电波搜索目标

$$D=150t \text{ (公尺)}$$

上式中， t 是以微秒來計算的。这是因为无綫电波跑得非常快，一秒鐘的時間对于无綫电波說來是太長了，无綫电波可以在一秒鐘之內跑完相当于繞地球赤道七圈半的距离。因此採用一秒鐘的一百万分之一作为時間的單位，称为微秒。从上式可以看出，无綫电波能在一微秒的時間內往返150公尺的路程。

4. 雷达的种类

由于工作原理的不同，目的和用途的不同，以及所用的波長，測量距离的远近等等的不同，雷达的种类是多种多样的。根据工作原理上的不同，雷达可以分成二大类：

(1) 連續波雷达——連續不斷地向空中發射電能的雷达屬於這一類，這種雷达再可以分為二類：

(甲) 利用都卜勒效应的雷达——譬如我們在火車站上聽到進站火車的汽笛聲比出站火車的汽笛聲音調要高；相反地，如果我們坐在火車中傾聽站上的鐘聲，進站時也比出站時為高，這種現象在物理學上稱為都卜勒效应。無線電波也有同樣的現象。當發射出去的無線電波遇到移動的目標時，反射回來的電波頻率就有所變更。變更的多少和目標物移動的速度有關。因此如果我們能測量出頻率的偏移，就可知道目標物的移動速度。這種方式的雷达是專門用來偵察運動物體的，但是不能偵察靜止的物體或緩動的物體。

(乙) 調頻雷达——在這種方式的雷达中，我們使發射出去的電波頻率，在不大的範圍中作周期性的變動，如圖4中註明“直接信號”的那條曲線所示。反射回來的電波頻率，也和發出

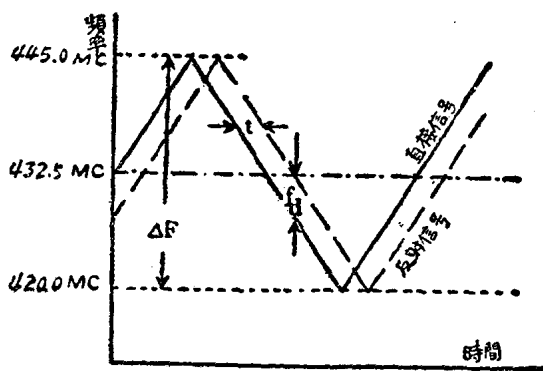


圖 4. 調頻雷达是頻率增減相繼變化的

去的一样，是变动的。但回波是从發射机地点出發再由目标物反射回來的电波，因此在時間上要落后于發射波，如圖 4 中註

明“反射信号”的那

条曲綫所示。于

是，在任何瞬間，

發射波和回波之間

就有了一定的頻率

差数。目标物距离

愈远，这个差数愈

大，距离較近，則

差数也較小。所以只要測定这个頻率差数，也就能推定目标物的距离。这种雷达在飛機上常用以測量高度，例如苏联 $\Phi B-2$ 型无线电测高計。

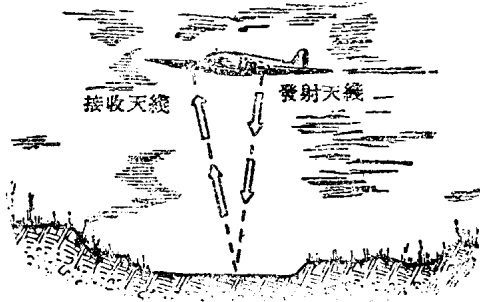


圖 5. 雷達測高計

(2) 脈冲波雷达：这种雷达是間歇地發出頻率極高（常称超高频）的脈冲波，即在很短的時間內發出强力的电波以后，停頓一段較長的時間，以便接收回波信号。这种雷达和蝙蝠利用超声波來測距十分相似。脈冲波雷达的应用最广，在以下各章中我們將更詳細地來討論它。

以上我們是根据雷达的工作原理來分类。此外，我們还可以根据雷达所使用的波長分为超短波雷达（波長为10公尺至1公尺）和微波雷达（波長在1公尺以下）。按測量的距离來說，有远程雷达、中程雷达和短程雷达。按使用处所來分，有船舶雷达、飛機雷达、地面雷达。按体積來分，則有固定雷达、移动雷达和輕便雷达。此外，尚有許多雷达还可以和目标物取得

联系，并具有遙控作用，如雷达指向、敌我鑑別仪、導航仪等。

5. 雷达所用的无綫电波——超短波和微波

在无綫电技术中应用的无綫电波一般可以根据它的波長來分为具有各种名称不同的无綫电波，如長波、中波、短波、超短波和微波等。

无綫电波的波長是以公尺來度量的，譬如說，一个發射机的發射波長是 500 公尺，那末就是說这种无綫电波每振动一次前進了 500 公尺的距离。由于无綫电波的行進速度已知和光速相等，就是 3×10^8 公尺/秒，于是任何一个无綫电波的波長(λ)和它每秒鐘振动的次数(f)可以用下式來換算：

$$f = \frac{3 \times 10^8}{\lambda}$$

例如，当波長是 500 公尺时，无綫电波每秒鐘振动的次数就是 6×10^5 次。

无綫电波每秒鐘振动的次数(f)称为頻率，用“赫”，“千赫”或“兆赫”作为單位，1“千赫”等于 10^3 “赫”，1“兆赫”等于 10^6 “赫”。例如，上面所講的那个无綫电波，它的頻率就是 6×10^5 赫，或 600 千赫。由此可見，每一个波長就相应地有一个頻率，无綫电波以頻率來分，就有低頻，中頻，高頻，超高頻和特高頻等。下表是实用上各种不同无綫电波的名称和它的波長与頻率的关系。

名 称	波 長	頻 率
長 波	3,000 公尺以上	100 千赫以下
中 波	3,000~50 公尺	100~6,000 千赫
短 波	50~10 公尺	6,000~30,000 千赫(即30兆赫)
超短波	10~1 公尺	30~300 兆赫
微 波	1 公尺以下	300 兆赫以上

前節中說到，应用最广的雷达是脈冲波雷达，其中所使用的波長屬於超短波和微波的範圍。这是因为根据超短波和微波的傳播性質來說，它們的行進路徑是直綫的，能够穿透高空电离層，遇到金屬導体能發生強烈的反射，遇到非導体如建筑物和山丘等也有相当强度的反射，所以非常适合于雷达的要求。同时，波長用得愈短，天綫的方向性也愈容易提高。所以，雷达一般使用这些波長很短的无綫电波。至于为什么用脈冲波來得好些？因为脈冲波是一种不連續的无綫电波，在一个極短的時間中，例如半微秒到1微秒，發出強烈的电波后，停止發射一个較長的時間，例如1000微秒在这个間歇時間中，容許回波返回。这样，就可以將發射机的电力集中在極短時間中以造成強烈的發射，同时在間歇時間中靜待回波的到來，可以使微弱的回波不致被掩盖。这种作用方式也是符合雷达的要求的，因此实用上广泛使用超短波和微波脈冲波雷达。

第二章 雷达的基本作用原理

前面說過，雷达是利用无綫电波的反射現象來測定目标物位置的一种无綫电設備。要知道目标物的位置，就必需測出它

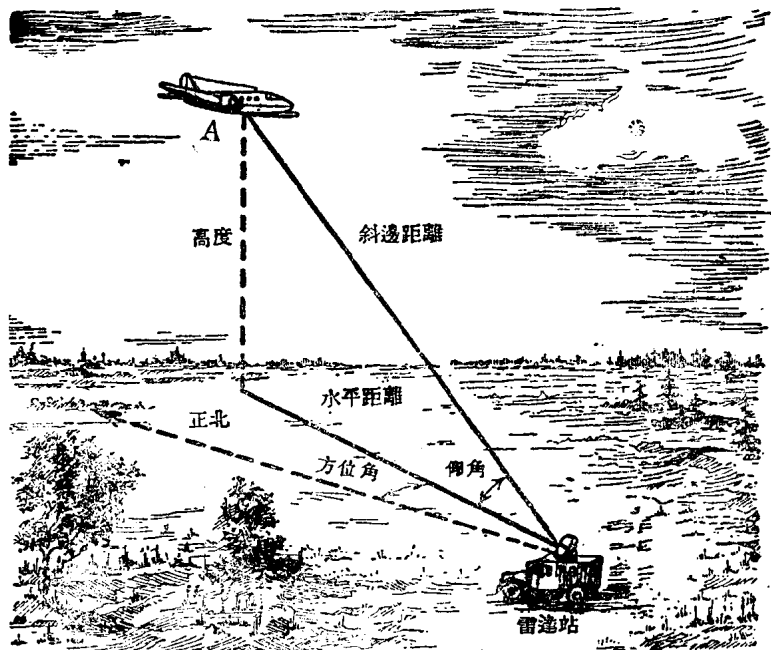


圖 6. 雷達測量目標示意圖

的距离和方向。如圖 6 中所示，如知道了斜边距离 D ，方位角 φ ，仰角 θ 后，那末目标物的位置就被肯定在 A 点。它的高度 h 和水平距离 d 也不难利用三角公式計算出來：

$$d = D \cos \theta$$

$$h = D \sin \theta$$

1. 雷達測距的基本原理

在上一章中我們已經提到过，利用无线电波來測距的基本公式为：

$$D=150t \text{ (公尺)}$$

時間 t 用微秒來計算，通常是靠一種特殊的儀器——陰極射綫管來完成的。它的計算方法如下（參考圖 7）：當發射機

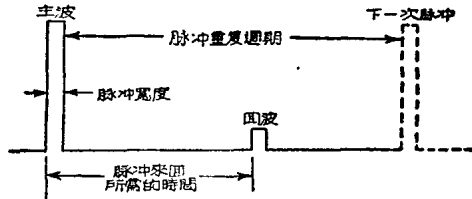


圖 7. 熒光屏上主波與回波的顯示

發出脈沖時，陰極射綫管中的電子射綫就立刻使熒光屏上出現一發亮的脈沖記號，稱為主波，同時電子射綫以均勻的速度向方描去，等到有回波信號來時，又出現一發亮的脈沖記號，稱為回波。如果目標物離雷達站較近，則反射波回來得快，在熒光屏上主波與回波間的距离近，這就表示無線電波往返所需的時間短；反之，如果目標物離雷達站較遠，那末回波回來得慢，在熒光屏上主波與回波間的距离就遠，這就表示無線電波往返所需的時間長。所以只要根據熒光屏上主波與回波的間隔，就可以推算目標物離雷達站的距离。

如果目標物離雷達站非常近，那末主波和回波可能相互靠攏合而為一，於是就無法估計主波與回波的間隔，也就無法測出很近的目標，但如果使發射脈沖的寬度很狹，那末就可以測得比較近的目標。所以雷達的所能測定的最短距离和它的發射脈沖寬度有關。例如脈沖寬度為10微秒的雷達就不能用來測量1.5公里以內的目标。

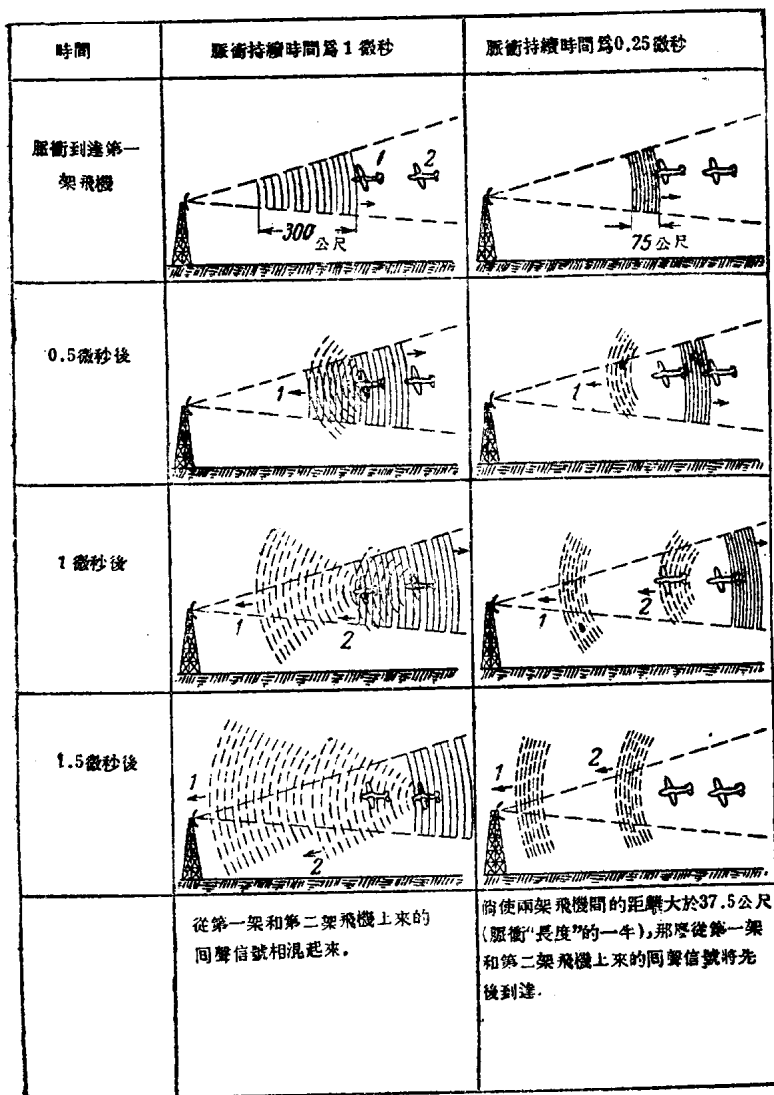


圖 8. 脈衝寬度(脈衝持續時間)和鑒別能力間的关系

脈冲寬度除了和所能測定的最短距離有关外，还決定雷達的鑑別能力。譬如有二个目標，彼此間的距離小于脈冲寬度，那末二个目標在熒光屏上的回波就合而为一，这样就無法辨別到底是一个目標，还是二个目標。所以脈冲寬度为十微秒的雷達就不能鑑別相距为 1.5 公里的二个目標。脈冲寬度愈狹，雷達的鑑別能力就愈高見圖 8。此外，脈冲寬度还決定測距的准确性，例如一架用來控制砲火的雷達，它的脈冲寬度是 0.3 微秒，那么它就能分辨相距 45 公尺的二个目標，并且測距的准确性也可能达到 ±45 公尺。

現在我們再來談一談雷達到底能測多远：首先我們先來談一談脈冲重复周期和最大測距的关系。所謂脈冲重复周期就是前一个脈冲和后一个脈冲之間相隔的时间 T 。假定有一个目標离开雷達站非常远，但我們仍可收到从那个目標上反射回來的信号，如圖 9 所示，不过回波是出現在第二个脈冲主波的后

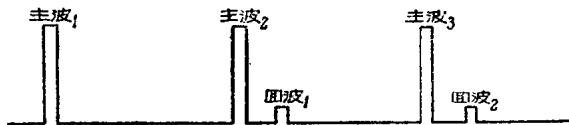


圖 9.

面，这样我們就被弄糊塗了：到底这个回波是第一个主波的反射波呢？还是第二个主波的反射波？所以脈冲重复周期只决定了雷達机在理想上的最大測距，根本不能作为实际上的最大測距。例如有一种飛機上用的搜索雷達，它的重复周期是 2500 微秒，照理它最远可以測量 375 公里，但事实上这架雷達最远却只

能測到65公里。这又是为什么呢？因为最大測距实际上和其它許多因素有关：

首先，它和發射机每次發射脈冲的总能量有关，發射总能量等于最大功率值与脈冲寬度的乘積。發射能量愈大，愈能達到远处。但根据实际經驗，最大測距是和發射总能量的四次方根成比例的，也就是說，發射功率虽提高了16倍，距离只增加一倍。

其次，天綫的方向性对于最大測距也有关系，方向性好的天綫，能够將能量集中成为很狹的一束發射出去，这样就可以达到远处。接收天綫的有效面積大，接收机的灵敏度高，最大測距也大。此外，目标物的特性和体积决定了它反射电波的能力，因此与最大測距也有关系，同一架雷达机用来測量船艦的距离竟可以比測量飞机的距离超过五倍以上。

綜上所述，实际上可用下面公式來决定雷达的最大測距：

$$D_m = \sqrt[4]{\frac{P_u A^2 \sigma}{P_n 4\pi \lambda^2}} \text{ 公尺}$$

式中： P_u —發射脈冲的最大功率值，單位是瓦；

A —接收天綫的有效面積，單位是平方公尺；

σ —目标物的有效反射面積，單位是平方公尺；

P_n —接收机可鑑別的最小反射脈冲功率，單位是瓦；

λ —脈冲波波长，單位是公尺。

这公式与前面所列出的决定雷达最近測距的公式

$$D = 150t \text{ 公尺}$$

合称为雷达測距的基本公式。