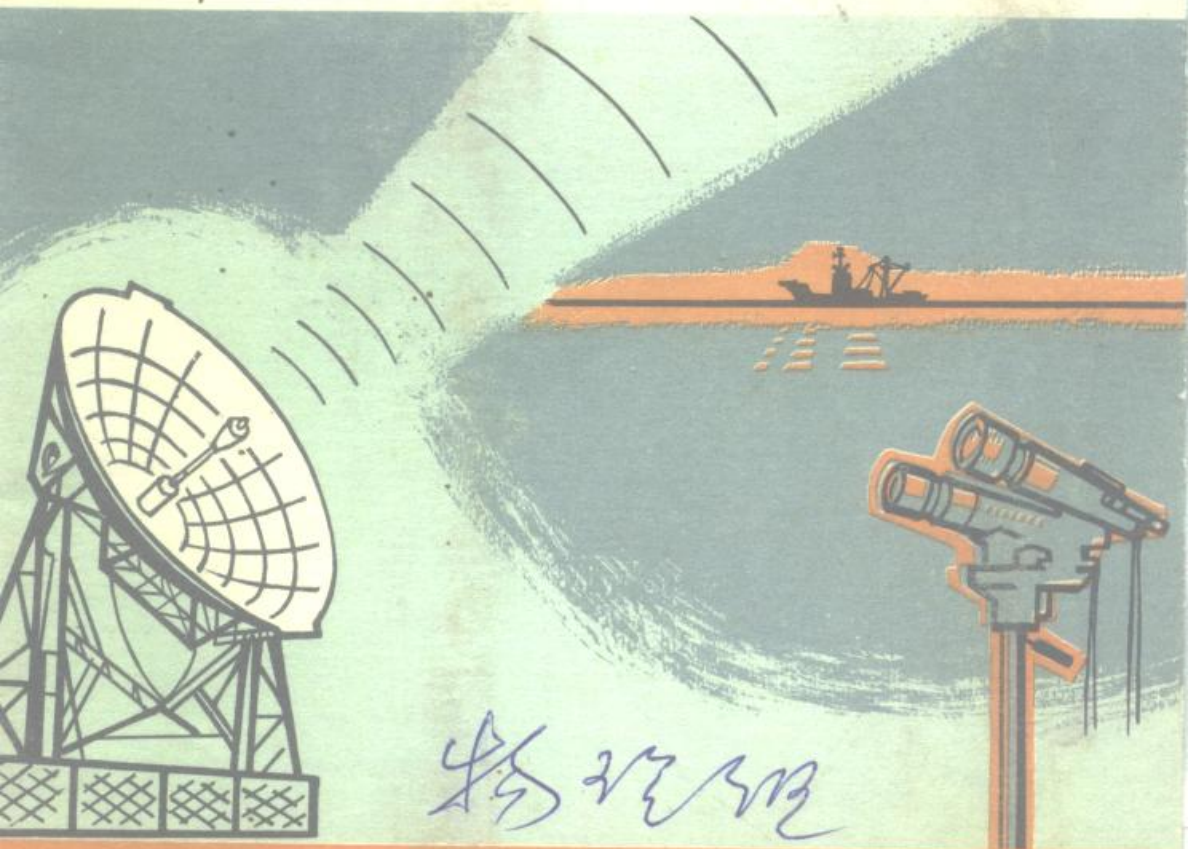




自然科学小丛书

声纳 雷达 激光雷达



物理论

北京人民出版

自然科学小丛书

声纳 雷达 激光雷达

陶望平

北京人民出版社

74 38 0432412

自然科学小丛书

声纳 雷达 激光雷达

陶望平

*

北京人民出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷三厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 2.375印张 35,000字

1974年4月第1版 1974年4月第1次印刷

印数：1—309,000册

书号：10071·26 定价：0.17元

编 辑 说 明

为了帮助广大工农兵和青少年学习自然科学知识，更好地为社会主义革命和社会主义建设服务，我们编辑了《自然科学小丛书》。

这套小丛书是科学普及读物，它以马克思主义、列宁主义、毛泽东思想为指导，用辩证唯物主义和历史唯物主义的观点，结合三大革命斗争实践，介绍自然科学基础知识。在编写上，力求做到深入浅出，通俗易懂，适合广大工农兵和青少年阅读。

由于我们水平有限，又缺乏编辑科学普及读物的经验，难免有缺点和错误，恳切希望广大读者批评指正。

目 录

- 一 什么是声纳、雷达和激光雷达?..... (1)
- 二 揭开波的秘密 (3)
 - 从水面上的波纹谈起(3) 音叉产生的音波(5)
 - 波的特性(6)
- 三 声纳、雷达和激光雷达怎样测定目标的位置、
距离、方向和速度? (8)
 - 怎样测定目标的位置?(8) 怎样测量目标的距
离?(9) 怎样测量目标的方向?(11) 怎样测
量目标的速度?(12)
- 四 优秀的海中“侦察员”——声纳 (13)
 - 声纳的特点(13) 怎样发射和接收超声波?(14)
 - 声纳的结构(16) 声纳在国防上的用途(17) 声
纳在国民经济中的用途(19)
- 五 国防的眼睛——雷达 (21)
 - 雷达的诞生(21) 雷达的结构(23) 雷达为什么
采用超短波?(24) 雷达指示器和电子射线管(26)
 - 在防空体系中(29) 雷达帮助对付导弹(34) 侦
察和跟踪洲际导弹(35) 什么是雷达网?(37) 雷
达的第二代——相控阵雷达的出现(38) 什么是
超视距雷达?(42) 导航的眼睛(45) 气象探测的
新助手(45) 雷达和宇宙航行(46) 向遥远的空

	间进军(48)	
六	后起之秀的多面手——激光雷达	(49)
	原子和发光现象(49) 光和原子之间的作用(51)	
	激光的特点(55) 能量集中的细波束和全息术在	
	激光雷达中的应用(57) 奇妙的激光器(59) 激	
	光雷达的应用(63) 激光雷达的优点和缺点(67)	
七	结束语.....	(68)



一 什么是声纳、雷达 和激光雷达？

声纳、雷达和激光雷达主要是在国防中应用的侦察武器。在茫茫的汪洋大海中，敌人潜水艇在何处，就必须用声纳寻找；在万里晴空中，敌人导弹和飞机在哪里，就必须用雷达侦察。至于激光雷达，目前已广泛应用于地面近距离和宇宙航行中精确测位，它在国防中应用的潜力，到目前还不能充分估量。声纳、雷达和激光雷达在国民经济中也有重要的用途。

声纳是英文缩拼字的音译，原意是“声音导航和测距”。声纳是在第一次世界大战期间发明的，从那时以来一直是海军侦察潜水艇的有效工具，后来又应用到测量海深和发现鱼群等方面。

雷达也是英文缩拼字的音译，原意是“无线电侦

察和测距”。它是在第二次世界大战前两年发明的。雷达主要用来侦察敌人的飞机和导弹从空中的偷袭，引导飞机和船舰的航行，在天文、气象的观测中也有广泛的应用。

激光雷达也叫做“莱塞雷达”，或“同相光定位器”，它是从英文字（Laser Radar）激光和雷达两字组合而成的。激光雷达是在一九六二年才出现的，它已用于近距离目标的精密测距和宇宙航行的测位。

目前，声纳、雷达和激光雷达的研究和应用，在我国已经获得很大的发展，特别是在国防事业中起着日益重要的作用。

声纳是利用超声波工作的，雷达是利用无线电波工作的，激光雷达是利用激光工作的，总之，它们都是利用物理世界中的“波”而工作的。它们的用途都是为了侦察和测量目标的位置，有时还要测量运动目标的速度。伟大领袖毛主席教导我们：“人的认识物质，就是认识物质的运动形式，因为除了运动的物质以外，世界上什么也没有，而物质的运动则必取一定的形式。对于物质的每一种运动形式，必须注意它和其他各种运动形式的共同点。”因此，为了理解声纳、雷达和激光雷达的工作原理，就必须首先知道波的本质和测量目标位置方法的共同点。

下面我们从揭开波的秘密谈起，接着介绍声纳、雷达、激光雷达的原理，并着重谈谈它们在国防上的应用。

二 揭开波的秘密

声纳、雷达和激光雷达都是利用波来工作的，那么，波到底是什么呢？其实波并不是什么神秘的东西，波是我们时时刻刻感受到的。例如我们耳朵听到的是声波；眼睛看见的是光波；收音机和电视机所接收到的是无线电波，我们就生活在波的世界里。

从水面上的波纹谈起

水波大概是人们最常见到的波了。把石头投入水中的时候，波纹沿着平静的水面向四周成圆形前进，一部分升起，另一部分下沉，整个水面呈现着波纹的形式（图1）。波动的水面一方面作上下摆动，一方面把

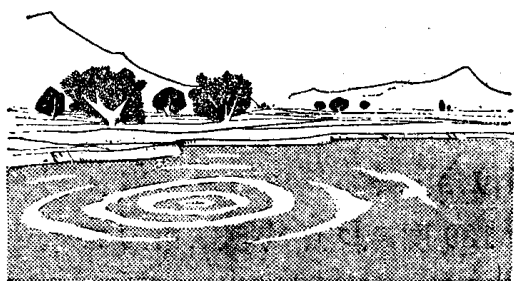


图1 水面上的波纹

波的运动向四周传播开来。波的一个最主要的特点，就是它能够传播。在白天我们能够看见物体，就是因为太阳的光波照射到地球的物体上，经过反射以后传播到我们的眼睛里。我们能够听到声音，也是因为声波能够从发声的地方传播到我们的耳朵里。

波还有一个重要的特性，就是具有波长。波的高升点叫做波峰，波的下降点叫做波谷，两个相邻的波峰或波谷之间的距离就叫做波长（图 2 左）。

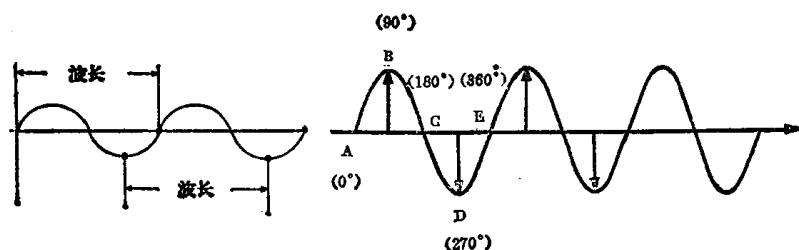


图 2 波长（左）和波的相位（右）

要完善的说明波，除了波长外，还需引入幅度和相位的概念。幅度指振动着的波的最大值，如图 2 右中 B 与 D 等都表示波的幅度。所谓相位是用从 0~360 度之间的角度来表示，例如在图 2 右中，A 点的相位角为零，B 点的相位角为 90 度，C 点的相位角为 180 度，D 点的相位角为 270 度，E 点的相位角为 360 度。在这个波长的范围内，其他各点也都有相应的相位角。相位的概念在后面提到的相控阵雷达和激

光雷达中是十分重要的。

波长的长短是由产生波动的振源振动的快慢来决定的。例如，把一个小石块吊在线上去搅动水面，如果石块上下运动的速度非常快，水面上产生的波纹就多，而它的波长就会短些。相反，如果把石块上下搅动的速度放慢些，水面产生的波纹就要少些，但是，它的波长却变长了。不但水波是这样，声波、光波和无线电波的波长的变化，也都是这样。在无线电技术中，振源一般叫做振荡器或发射机。声纳、雷达和激光雷达都有由振荡器组成的发射机，产生波并且把波发射出去。

音叉产生的音波

在物理课的教学仪器中，有一种叫做音叉。当它受到敲击以后，音叉臂就会振动起来。现在来看图3所示的音叉右臂，它先向右振动，把它的右方的空气压缩，形成密层。这种密层不是停留在原处，而是向空气中传播开来。当音叉臂向左振动的时候，在它的右边

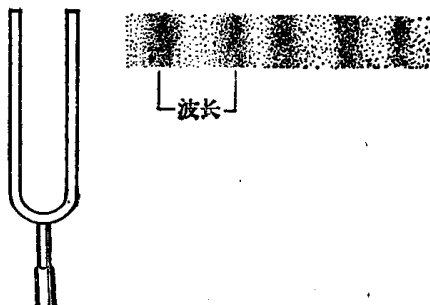


图3 音叉和它使空气形成的疏密层

又产生了空气的疏层,这个疏层也不是停留不动的,而是随着压缩的密层传播开去。如果能够看见空气的疏密层,那么在音叉开始振动以后,可以看到如图 3 上方的空气疏密层的分布。密层或疏层的间隔就是波长。

如果同时敲击长短不同的音叉,就会发现,臂长的音叉振动慢,产生的波长较长;臂短的音叉振动快,产生的波长较短。音叉每秒钟振动的次数,和上面所谈的石块在每秒钟上下搅动的次数,都叫做频率。

由水面波纹和音叉的振动这两个例子可以知道,频率越高,就是振动得越快,产生的波长就短;频率越低,就是振动得越慢,产生的波长就长。因此频率和波长成反比例。对于波来说,说它的频率很高,或者说它的波长很短,含意是一样的。频率所指的每秒钟振动多少次,在无线电技术中就叫做多少周(或称多少赫芝)。

波 的 特 性

科学实验告诉我们,声波在空气中传播的速度是不随波长的变化而改变的,在正常的天气和温度下,每秒钟为 340 米。光波和无线电波都是电磁波,传播的速度也不随波长的变化而改变,每秒钟为 30 万公里。声纳、雷达和激光雷达要测量目标的距离,都要求

预先知道这个波的速度，由这个速度再推算出距离来。

不论声波或无线电波，当波长改变到一定的数量级的时候，就会引起质变，使波的特性发生很大的变化。例如当声音的频率提高到每秒钟两万周以上的时候，我们的耳朵就听不到了，这种波叫做超声波。又如当无线电波的频率提高到每秒钟一万亿周左右的时候，就进入光波的区域了。

声纳、雷达和激光雷达为了要测定目标方向，必须把波聚成很细的波束，它们都有一个发射波的装置；工作原理和探照灯聚光原理类似，都有一个反射器和一个辐射源。不论哪一种波，要想把它聚成很细的波束，所用的反射器，尺寸都必须比波长大几倍到十倍以上，在雷达中甚至需要达到波长的几十倍到几百倍。由于我们听得见的声音的波长在几十厘米到几米之间，而声纳的反射器不能做得很大，因此声纳只能利用波长为几厘米的超声波。在雷达中也是这样，雷达所用的无线电波的波长在几米到几毫米之间，在无线电技术中叫做超短波或超高频。无线电广播和通信用的无线电波的波长一般在几十米到几百米，不能用作雷达的发射波。

波还有一种特性，就是当它遇到目标的时候，目标的尺寸比波长越大，产生的反射波也就越强，这是

声纳采用超声波和雷达采用超短波的另一个原因。

三 声纳、雷达和激光雷达 怎样测定目标的位置、 距离、方向和速度？

怎样测定目标的位置？

声纳、雷达和激光雷达测定目标位置的方法基本上是相同的。只要说明其中一种，其他两种也就容易

理解了。图 4 表示雷达测定飞机位置的情形。从图中可以看出，要测量飞机的位置，必须测出一个斜距和两个角度——方位角和仰角。斜距是雷达和飞机之间的直线距离。以北方为标准，飞机所处的方向

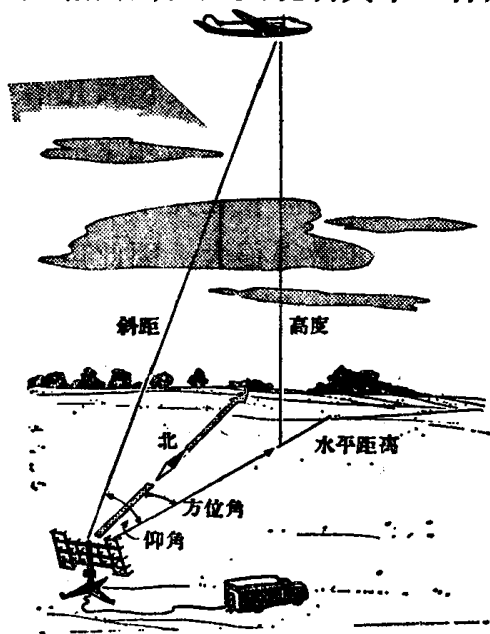


图 4 雷达测定目标的位置

的夹角叫做方位角；飞机的斜距和水平面之间的夹角叫做仰角。简单说来，声纳、雷达和激光雷达的任务就是测定目标的一个距离和两个角度。在声纳、雷达和激光雷达中，有时还要求测量运动目标的速度。

怎样测量目标的距离？

我们知道，声波、电磁波和光波传播的速度都是一定的。声波传播的速度叫做声速；电磁波由于和光波的传播速度相同，所以，它们的传播速度都叫做光速。因此，如果能测量出声纳、雷达和激光雷达所发出的波在遇到目标以后再反射回来的时间，那么根据物理学公式“距离等于速度乘时间”，就可以算出距离来了。这可以用回声的例子来说明。

不少人会有这样的经验，如果向远处的山峰大喊一声，那么，过一会儿便能听到回声（图5）。回声是声波的反射现象。声波以每秒340米的速度向山峰前进，等到碰着山峰被阻挡住以后，便朝发声的方向反射

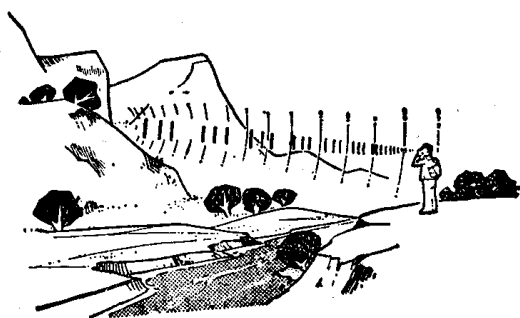


图5 利用山峰的回声测量距离

回来。如果声源距离山峰比较远，声波要行走比较长的路程才能返回，回声就来得晚；如果声源距离山峰比较近，声波行走比较短的路程就能返回，回声就来得快。要是用精确的计时仪器，测量出从发声到听见回声的这段时间，然后再乘以声波速度（每秒钟340米），就可以算出发声地点和山峰之间的来回距离了。例如有人向远处的山峰喊了一声，在12秒钟以后听到了回声，那么声波所走过的总路程就是12乘340米，也就是4080米。由于声波是一来一回的，因此这个数字的一半——2040米就是声源和山峰之间的距离。

远在一九〇四年，国外有个科学家就曾经多次试验利用声波来测量距离，他曾经坐着气球上升到空



图6 蝙蝠利用超声波发现障碍物

中，向地面大声叫喊，过了10秒钟以后，收到了清晰的回声，由此计算出气球位于1700米的高空。

在自然界中，蝙蝠也能利用超声波发现前方有没有障碍物。它用嘴发出超声，用两只耳朵接收回声

(图6)。它还能利用这个方法捕捉虫子。海里有许多动物，例如海狮、海豚和鲸鱼等，也能利用超声波发现目标。

怎样测量目标的方向？

声纳、雷达和激光雷达测量目标的方向，在具体方法上虽然千变万化，但是，它们的基本工作原理却是相同的，和探照灯寻找飞机方向的方法一样。在夜间，探照灯把光聚在一起，能够按方位角和仰角向各个方向旋转，向夜空发出细圆的光束，照到敌机以后，就一直跟踪照射，那时探照灯光所指的方向就是目标的方向。目标的方位角和仰角很容易从探照灯光所指的方向测量出来。

为什么探照灯一定要把光聚成一个细圆束呢？这一方面是为了集中灯光的亮度，使目标更容易被发现；另一方面是为了从灯光所指的方向，得到目标的方向。可以设想，如果探照灯的光线是向各个方向均匀照射的，即使你从亮光里找到了目标，也是无法测量出它的方向来的。

为了测量方向，声纳、雷达和激光雷达也都要把波聚成细圆的波束，它们发射波的装置和探照灯有些类似，都有一个反射器和一个辐射源，这是它们共同

的地方。

怎样测量目标的速度？

利用波测量目标的速度，我们可以拿生活中常见的例子来说明。如果你细心体察一下，就会发觉当火车鸣着汽笛向你开来时，响亮的笛声不但越来越响，而且声调越来越尖。声调变尖是由于我们听到的汽笛声的频率在增加。如果鸣着汽笛的火车远离我们而去，我们也会感觉到汽笛声的声调逐渐降低。声调变低是由于我们听到的汽笛声的频率在降低。运动着的发声物体，由于具有速度而使声音频率改变的现象，叫做多普勒效应。多普勒效应是各种波都有的一种很重要的现象。

当雷达或激光雷达测量运动目标时，例如测量飞行中的飞机或导弹等，反射后的无线电波或光波由于受到目标本身运动的影响，它的频率也会改变。频率改变的数值与运动速度成正比，根据反射回波频率改变多少，就可算出目标运动的速度。目前，雷达和激光雷达就是利用多普勒效应来测量目标的速度。这种方法也是目前测量导弹、人造卫星和宇宙飞船速度的最精确的方法。

四 优秀的海中“侦察员”—— 声纳

声 纳 的 特 点

声纳是利用超声波工作的。也许有人要问，为什么不用雷达来代替声纳呢？

据科学研究，无线电波在水中传播的时候，水会吸收无线电波而产生热，这种现象叫做损耗。对于超短波来说，这种损耗更严重。这说明无线电波是不容易通过海水的。因此，利用雷达就不能侦察到海底下的目标。但是超声波却可以在水中畅通无阻，所以，声纳能担任海中“侦察员”，而雷达不能在海面下工作。

为什么声纳不用普通声波，而一定要用超声波呢？这有三个原因。第一是超声波的波长短，容易聚成细波束。第二是由于波长比目标尺寸越小，反射越强，超声波在产生反射波方面是有利的。这两点在前面已经提到过。第三是超声波源能够产生很强的功率。近代超声波技术能够产生几百到几千瓦超声波的功率。而由喇叭发出的普通声波效率很低，只能把百分之一的电能变换成声音，要产生比超声波强的普通

声波是很难办到的。因此，声纳只能利用超声波。

怎样发射和接收超声波？

产生超声波，通常用两种方法：一种是利用晶体的压电效应；另一种是利用磁的伸缩效应。

什么是晶体压电效应呢？假如把石英这种晶体按一定方向割成薄片，它就具有这样的特性：如果压缩它，它便伸长而变薄，而且上面产生正电荷，下面产生负电荷；如果在上下用力拉，它便缩短而变厚，上

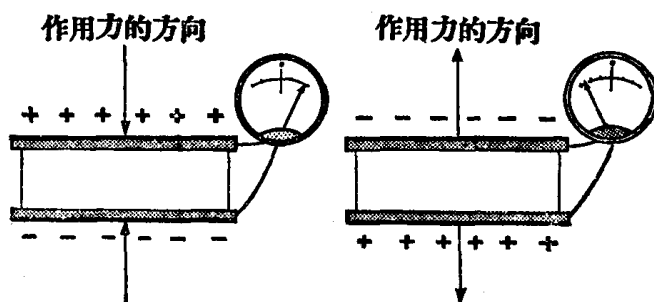


图 7 压电效应的产生

面产生负电荷，下面产生正电荷(图 7)，这就叫做晶

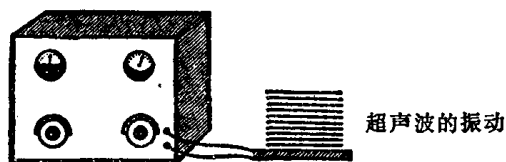


图 8 振荡器产生的振荡电流加在晶体上产生超声波

体的压电效应。如果把电子振荡器产生的具有几万周的振荡电流加到晶体上(图 8)，那么晶

体就会产生忽儿变薄忽而变厚的振动，使薄片周围的物质(如空气或液体)也随着发生波动，这就是超声波。

除了石英以外，利用钛酸钡以及其他晶体也能产生压电效应。

磁的伸缩效应，是利用绕有线圈的铁镍合金产生的。当线圈中有电流通过的时候，由于磁场的作用，铁镍合金便会随着线圈中的电流的频率而伸缩。铁镍合金在伸缩的时候，它的两端便发出了超声波。图 9 中的圆棒是铁镍合金，下面是线圈，当有频率每秒几万周的电流通过的时候，圆棒两端就会产生超声波，如果一端放在液体里，就会看见液体由于超声波而引起的浪花。

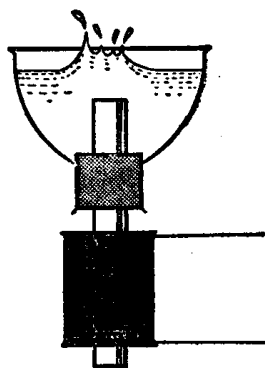


图 9 利用磁的伸缩效应产生超声波

接收超声波也是利用同样的原理。当超声波射到

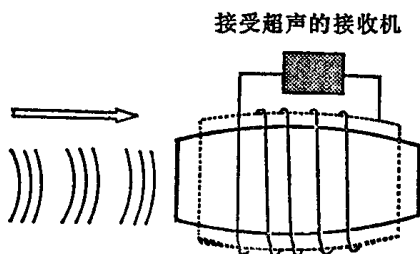


图 10 超声波的接收示意图

晶体或铁镍合金棒上的时候，它们就会发生振动而产生电流。这种电流由接收机的放大器放大以后，就完成了超声波的接收过程(图 10)。

声纳的结构

声纳是由振动器、收发控制器、发射机、接收机和距离指示器五部分组成的（图 11）。振动器是利用

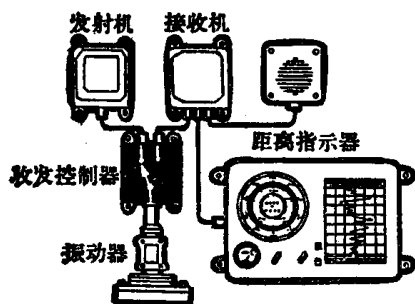


图 11 声纳的结构

晶体或铁镍材料制成的，能够产生或接收超声波。它装置在船底，能够四面八方地旋转，以便测出冰山和潜艇等目标的位置。但是，有些声纳的任务只是测量

海深，所以只需要垂直地向海底发射，不必旋转（图 12）。超声波在海水中的传播速度每秒钟为 1500 米；

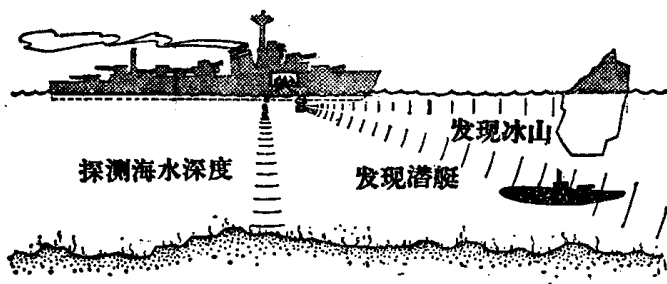


图 12 声纳探测海水深度和发现冰山及潜艇

在淡水中每秒钟为 1400 米。根据发射波反射回来的时间以及波的进行速度，就可以测出海的深度了。

超声波的发射方法是：短短地发射一下，等回波到来，再短短地发射一下。这种发射方法好象人的脉搏的跳动一样，因此叫做脉冲式发射。脉冲式的发射既能区分发射波和反射回波到来的时间，便于测量距离，还能节省发射功率，减少能量的消耗。由于声纳在发射超声波的时候，接收机可以不必工作，而在接收回波的时候，发射机又可以不必工作，所以要有一个收发控制器把振动器交替接通。

发射机是一个功率比较大的电子振荡器，它能产生每秒钟振动几万周的电流。接收机是把接收到的反射回波放大，然后在距离指示器上指示目标的距离。接收机旁边的喇叭在发现目标后会发出响声。距离指示器上有两种指示装备。左面有一个旋转圆盘，上面装有一个小氖气灯泡，圆盘面上周围刻有距离多少米的记号，根据回波信号到来时间的迟早，旋转的氖气灯泡会在相应的位置亮一下，使观察员能够及时了解目标的距离。距离指示器的右面能够自动地进行连续记录，并且告诉观察员有没有目标以及目标的距离。也有的声纳和雷达一样，装有用电子射线管构成的指示器。

声纳在国防上的用途

在海军舰艇上装置的声纳，除了可以搜索隐藏在

水中的目标，如潜艇、冰山、水雷、鱼群以及暗礁浅滩以外，还可以侦察停留在水面上的敌人舰艇，因为船身有相当大的一部分是在水面下的。此外，声纳在一定的距离内，还可以和另一个装有声纳的舰艇互通信号，就象地面上用无线电波通信一样。利用舰艇上的声纳测量目标位置，最大距离可以达到几公里；用来通信可以达到更远的距离。

还有一种舰艇上使用的声纳，只能测定潜艇的方

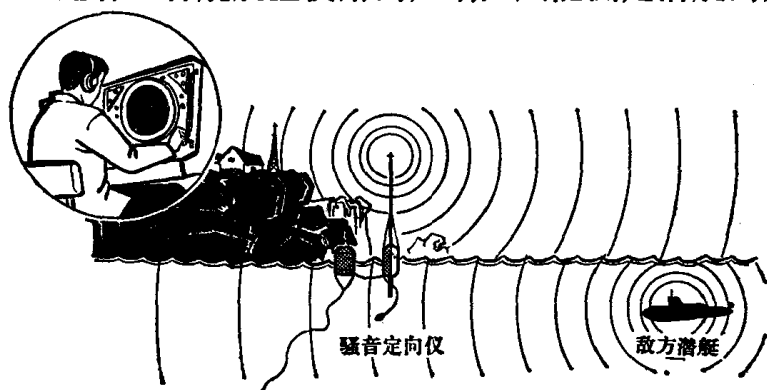


图 13 骚音定向仪测量潜艇的方向

向，叫做骚音定向仪（图 13）。它没有发射部分，不能利用回波确定目标的距离，而只能根据水中的音响来测定目标的方向。这种仪器也用于近代海防警戒。在海岸上装置骚音定向仪以后，一旦有敌舰和潜艇在附近海面和水中的活动，它们所发出的音响（声波）就会被骚音定向仪收到，报告指挥所。骚音定向仪还可

以了解我方舰艇发出的鱼雷在水中运动的情形，收听鱼雷的爆炸声，以确定是否命中目标，也可以观察敌人布设的水雷和鱼雷情况。

声纳在国民经济中的用途

声纳的自动记录设备，能够在航线上对海深进行连续而准确的观察，因此，可以得到海洋深度图。我们可以利用声纳来发现因故而沉没海底的轮船。图14是声纳对沉没船只的记录示意图，从图上可以看到轮船在海底的轮廓。

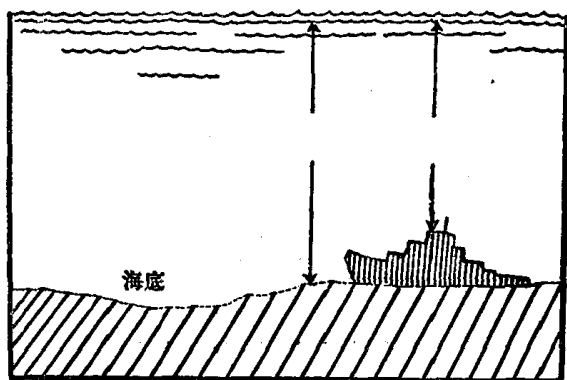


图 14 声纳对沉没船只的记录示意图

根据超声波在海底的反射，还可以判断海底的类型。比如峭壁礁石的海底具有强而清晰的回声。如果海底砂质或淤泥很多，回声的强度就会大大减弱。如果在砂层之下还有一层更密集的物质，那么，利用声纳还可以发现这个“第二层海底”，并且确定上面一层的厚度。由此可见，声纳在海洋科学研究中已经成为观察海底结构、研究鱼类

生活和发现新渔场的不可缺少的帮手了。

声纳装在渔轮上，可以对鱼群和虾群进行探测，因此，这类声纳叫做超声波鱼群探测器。这类仪器按照测向的不同，分为垂直式、水平式、垂直水平两用式和辐射式四种。垂直式的可以探测水深两千米以内的鱼群；水平式的可以探测船身左右 150 度方向的鱼群和暗礁；辐射式的可以搜索渔船四周的鱼群。有的还能估算出鱼的网获量。图 15 表示鱼群探测器在鱼

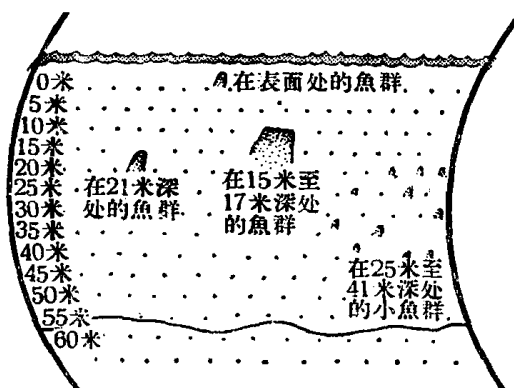


图 15 声纳探测鱼群的纪录

类聚集成群区域的记录，这个记录可以从自动记录器上取下记录纸观看。根据记录显影形状的不同，可以确定鱼群在各水层中的

深度、大小和密度，并且可以区分鱼群的类别。有的超声波鱼群探测器还装有报警装置，当船只附近发现鱼群的时候，它能自动地发出音响，有经验的工作人员，凭音响和记录结果，就可以辨别鱼群的大小和类别。

根据声纳的原理，可以制成供盲人用的定向仪器

(图 16)，这是由一个超声波辐射器和一个接收器组成的。整个仪器可以提在手中。盲人可以把装有电池的小箱子绑在腰上或者放在衣袋里，用耳机接收从障碍物反射来的回声，从而发现 10 米以内的障碍物。

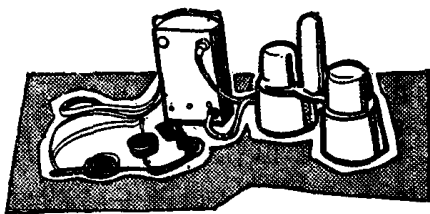


图 16 供盲人用的超声波定向仪

五 国防的眼睛——雷达

雷达的诞生

雷达是由于防空的迫切需要而产生的。先来看看飞机在战争中应用的简况。飞机在战争中的大规模应用，开始于第一次世界大战。当时速度最快的侦察机每小时飞行二百多公里，而轰炸机的飞行速度每小时只有一百多公里。在第二次世界大战前夕，歼击机的飞行速度达到了每小时五百多公里，几乎接近音速的一半，重轰炸机的速度每小时也达到了四百多公里。在第一次世界大战开始的时候，发现敌机的方法是用人耳去听飞机逼近的响声。后来制成了防空听音器(图 17)，用四个大喇叭来侦察飞机的动向。它的灵敏

度比人耳提高了很多，并且能测出方向。听音器虽然可以测出方向，但是不能测量距离；如果要测量距离，还得用光学测距仪。这是直到二十世纪三十年代初期，防空侦察所使用的基本方法。

在二十世纪三十年代以后，当飞机的飞行速度接近音速一半的时候，上述陈旧的防空侦察方法已经不能应付了。听音器收听的距离非常短，只能达到二、三十公里，而且在飞机的声音到达听音器这段时间内，飞机实际上又飞行了几公里到几十公里（图17）。飞机发出声音时的位置（虚线）和收到声音时飞机的位置（实线）已经有很大的不同，因此造成了测量上

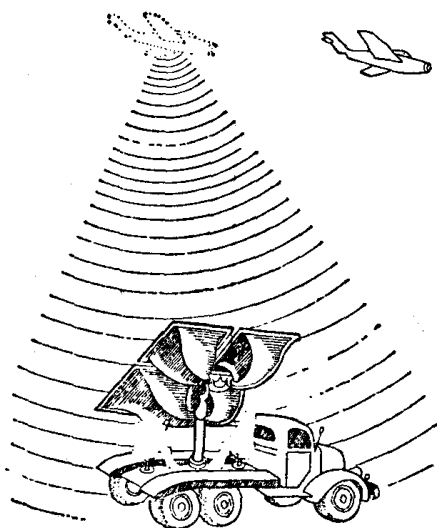


图 17 防空听音器

的很大的误差。至于利用光学仪器测定距离，由于飞机飞得又高又快，在天气良好的条件下已经不容易得到正确的测量数据，更不要说在天气恶劣的时候和晚间了。

如何快速地发现 and 测量飞机的位置呢？人们首先想到的是声波、

光波和无线电波。但是，声波和超声波由于在大气中衰减严重而不能达到很远的距离，光波不仅要暴露自己，而且白天不能应用，因此最后考虑只有用无线电波来完成这个任务。无线电波的速度比音速要快八十万倍，在测量飞机距离的时候，不会象听音器那样因为飞机速度太快而引起误差。因此，大约在一九三五年以后，雷达技术在世界一些国家先后出现了。那时各国都是严守秘密的。雷达的秘密直到一九四五年以后才公开出来。

雷 达 的 结 构

雷达的类型很多，结构也各有不同，但是基本上都包括七个部分，就是定向天线、收发开关、发送机、脉冲发生器、接收机、指示器和电源（图18）。这里谈的主要指脉冲波雷达，另有一种调频连续波雷达，主要用在后面谈到的雷达高度计中。

雷达发射无线电波是采用脉冲的方式工作的，因此必须由脉冲发生器产生脉冲波，来控制发送机定时发射无线电波，和定时停止发射而专门接收。收发开关是把天线或者和发送机接通，或者和接收机接通。收发开关的作用原理和声纳中收发控制器的作用相同。

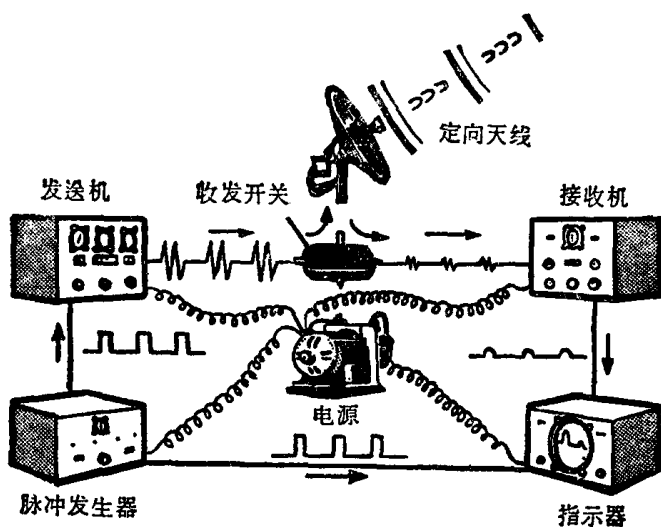


图 18 雷达的结构

雷达在结构上比声纳要复杂得多，一是因为雷达要产生强功率的超短波，不象产生超声波那么简单；二是因为指示器要用电子射线管来组成，结构也比较复杂。

雷达为什么采用超短波？

有三个原因使雷达必须采用超短波：一是因为波长越短，天线的反射器可以造得越小，便于装在汽车或飞机上。二是因为波长越短，目标的反射越强。三是因为在地球周围的高空，有一层厚达几百公里的电离层包围着，波长在 10 米以上的无线电波照射在电离

层上都会发生反射,只有波长在 10 米以下的无线电波才能透过电离层而直达太空。对雷达来说,电离层如有反射,往往可能误认为是信号,以致造成很大的差错。最初雷达用的无线电波的波长都是十几米,在发现这个问题以后,雷达用的无线电波波长才改用了 10 米以下的超短波。目前,雷达的波长一般是几米到几个毫米之间。

雷达采用超短波以后,必须应用特殊的电子管,常用的有调速管、灯塔管、磁控管、橡胶管和行波管(图 19)。近年来还逐渐应用了参量放大器和脉

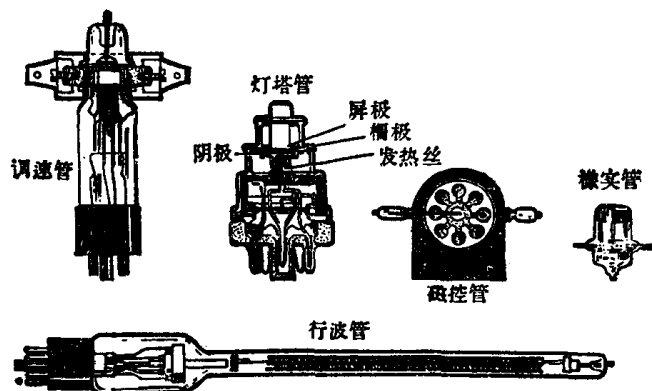


图 19 雷达应用的特殊超短波电子管

泽,至于雷达接收机,已逐步采用晶体管和固体组件。

雷达用的超短波天线也有各式各样的构造,最常用的结构很象探照灯,有一个抛物面反射器,在焦点

上有一个发出无线电波的辐射器。图 20 是抛物面反射天线的各种构造。雷达天线最主要的特点是有方向性，能在仰角和方位角方向上灵活地旋转，以便测量目标方向。

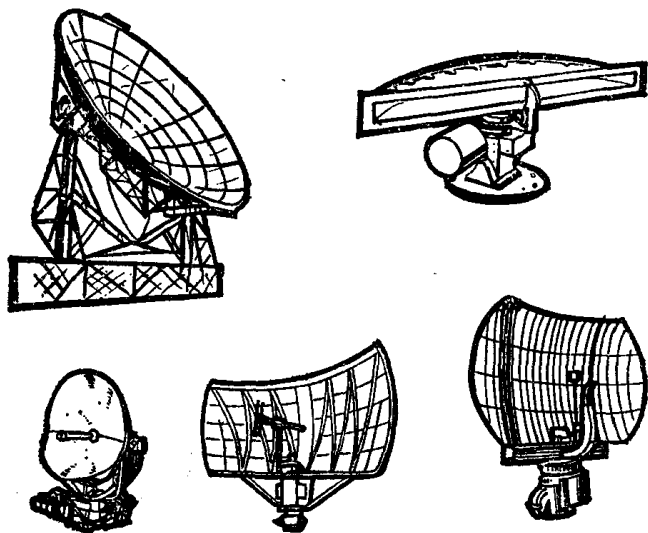


图 20 各种雷达抛物面反射天线的构造

雷达指示器和电子射线管

雷达怎样在指示器上测量发射波和回波的时间呢？这是用电子射线管来完成的。雷达所用的电子射线管在构造上和电视机的显像管大同小异，只是在画面组成上有很大的不同。

在雷达中有一种常见的指示器，如图 21 所示。在

它的电子射线管内，电子从左到右作一点点连续地扫描的时候，荧光屏上就会一点点地发亮，出现一根亮线。这好比在黑暗的地方，燃着一根香在空中挥舞，香头上的一点火光的连续运动，看起来好象是连续的亮线一样。这是因为人眼看见一个亮点以后，在约为 0.1 秒的时间内，眼膜上仍然保留着这个亮点的缘故。

在指示器中，我们可以控制电子射线管内电子从左向右的扫描时间，比如控制为五百分之一秒，那么在荧光屏上出现的亮线的长度就代表了时间。雷达在发射无线电波的时候，在亮线的起端作一个尖峰记号；在收到目标的回波的时候，又在亮线上作一个尖峰记号。这样，两个尖峰相隔越近，就说明回波的时间短；两个尖峰相隔越远，就说明回波的时间长。指示器就是这样来测定目标回波的时间，从而计算出目标的距离（图 21）。

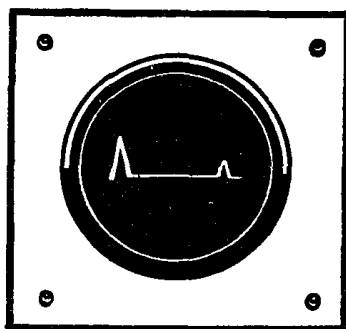


图 21 在雷达指示器上见到的发射波和目标回波

也许有人要问：“能不能在雷达指示器上看到类似照片的图形？”能！雷达是能够做到的，不过不象真正的照片那样逼真。雷达指示

器有十多种，上面谈到的只是一种常用的距离指示器。有的指示器不仅能够指出目标的距离，还可以指出目标的方位角和仰角。有的指示器还能测量出飞机的高度呢。

在雷达指示器中，有一种用途相当广泛的平面位置指示器，从那上面能够看到以雷达为中心的照片似的图像，目标的分布可以一目了然。这种指示器在一九四〇年左右出现，是模仿电视画面形成的原理制成的。当飞机经过沿海城市上空的时候，雷达平面位置指示器上所显现的图像就同图 22 所表示的那样。图



图 22 沿海城市上空雷达平面位置指示器图像

上黑色的是海和河流，轻淡的素描的是城市里的房屋或工厂。周围的刻度指明了目标的方位角，距离由人为地加上的两个白色同心圆圈来估计，以便根据目标所在的位置，估算它和雷达之间的距离。

平面位置指示器可以装置在飞机的雷达上，用来观察地面上的目标；也可以装置在机场港口上，用来观察飞机或海面上的船只。因此，它在国防和国民经济中都有很重要的价值。

平面位置指示器上的图像类似照片，但是不象照片那样能看清目标的轮廓，这是因为无线电波的反射和光的反射不同。在改用激光雷达以后，可使得到的图像和照片比较接近。

在防空体系中

在防空体系中应用的雷达，对付敌机的大致有六种类型：远程警戒雷达、引导雷达、截击雷达、炮火瞄准雷达、探照灯雷达和高射炮弹引信雷达。此外还有专门对付敌人导弹的雷达。

图 23 就是远程警戒雷达的天线外形。对这种雷达的要求是：能够发现 400 公里以外的敌机，侦察的

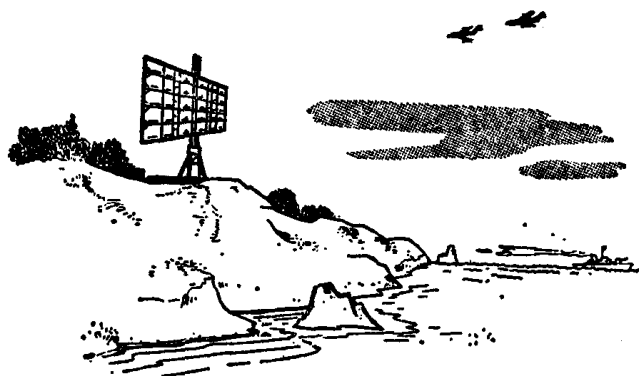


图 23 装置在海岸线或边界上的远程警戒雷达天线

距离要远，但是精确度要求不高。当远程警戒雷达确定了敌机的高度、距离和方向以后，用无线电话报告

给指挥所。如果指挥所这时决定用歼击机迎击敌机，就一方面把迎击命令下达给歼击机阵地，一方面把敌机的位置传给引导雷达，由它引导歼击机逼近敌机。在歼击机接近敌机以后，机上的截击雷达也开始启用，协助机上的炮火瞄准敌机，并且在一定距离内开火射击。

引导雷达的天线由两部分组成，能产生两个发射波束，彼此成为V形。在工作中，整个天线作圆旋转（图24）。这种雷达要求精确度很高，侦察的距离在200公里左右。

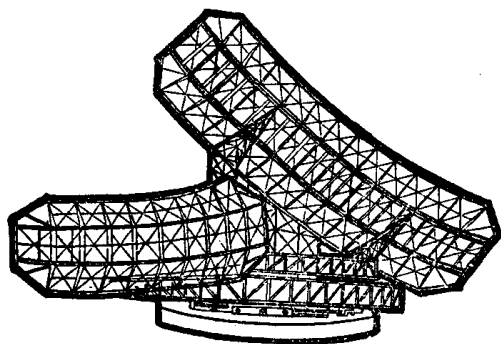


图 24 引导雷达天线的外形

歼击机上用的截击雷达作用距离只有几十公里，歼击机上的飞行员不是依靠眼睛而是利用截击雷达瞄准敌机开炮的。这种雷达的指示器横轴表示方位角，纵轴表示高低角，而目标由荧光屏上亮点显示。这种雷达和地面引导雷达一起配合使用，最初由地面指挥人员用无线电话指挥，当敌机已在歼击机雷达测程范围内，由无线电话通知歼击机开启机上截击雷达，这

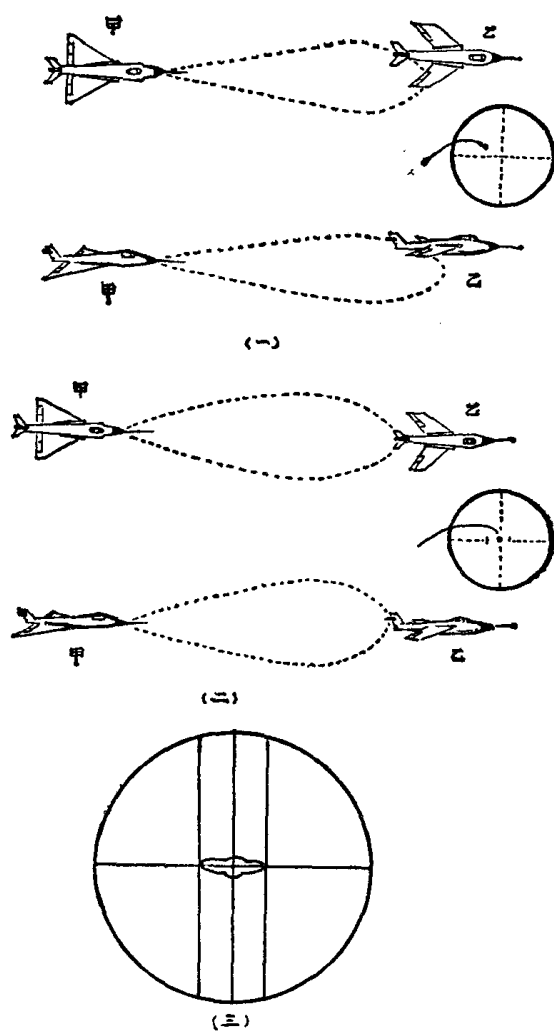


图 25 截击雷达指示器显示目标的示意图
 1 敌机在左上方情况 2 敌机在正前方的情况
 甲表示我机, 乙表示敌机
 3 带翅膀亮点显示, 敌机目标已在火力范围内

时指示器荧光屏上就可看到代表敌机的小亮点（如图 25·1）。如歼击机加速向左上方飞升，可以看到亮点接近荧光屏的中心；歼击机和敌机的距离越来越近，反射回来的电波也越来越强，指示器内会产生另一种信号，使亮点向两边象翅膀一样伸展出来，而这两边翅膀长短与两机距离成比例（如图 25·2）。当亮点两翼伸展到碰着指示器上两根特设的平行纵线后（如图 25·3），表示敌机已在我机火力范围内，即可开火射击，狠揍敌机。目前有的截击雷达能自动地测量敌机的距离，用数字式仪表将距离显示出来，观察时比较方便。

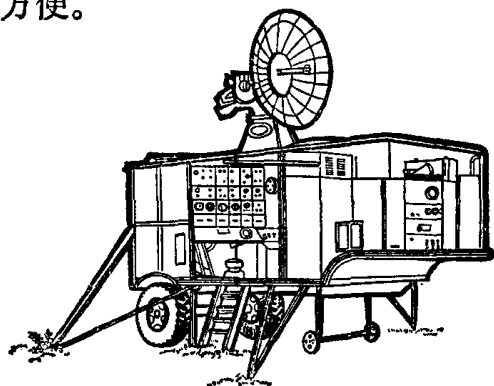


图 26 炮火瞄准雷达

炮火瞄准雷达（图 26）可以和四到六门高射炮配合，组成一个射击单位，它能够自动使高射炮瞄准敌机。这类雷达作用距离只有几十公

里，但是精确度极高。雷达的机件装在车子内部，天线装在车厢的外部顶上。运输时可以缩到车里去。

探照灯雷达是装在探照灯架上的(图 27)，灯的上方有一根或两根发射天线，下面四根是接收天线。当雷达没有搜索到敌机的时候，可以不发出探照灯光，以免暴露自己。

雷达中体积最小，重量最轻的要算是高射炮弹上用的引信雷达了(图28)。整个雷达是由三个到四个比

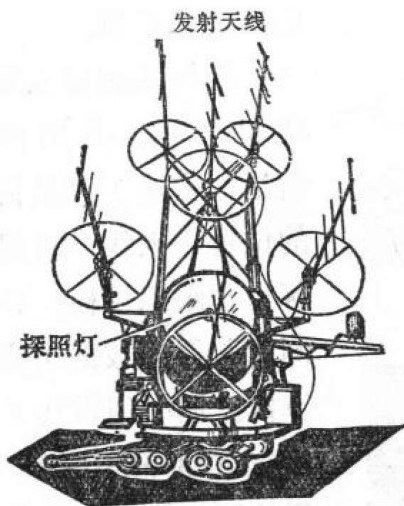


图 27 探照灯雷达

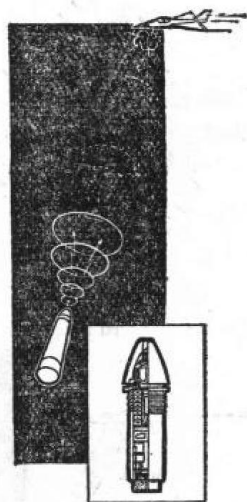


图 28

小拇指还细的电子管构成的(后又改用晶体管)，装在炮弹顶部。这种引信雷达也叫做变时信管，它是利用雷达反射的原理制成的。引信雷达发射的无线电波，在接近目标时就有回波反射回来，使高射炮弹在距离目标 20 多米的时候，立即爆炸，以便击落敌机。这

种引信雷达使高射炮命中率提高了 10 倍左右。

雷达帮助对付导弹

防空导弹的制导系统主要有两种类型，一种是指挥式制导系统；另一种是波束式制导系统，都由雷达来控制。

指挥式制导系统如图 29 所示。共用两个雷达，雷达 1 测量目标的位置，天线一直保持着自动跟踪目标，并将测量所得的数据送往计算机。同时用雷达 2 测量防空导弹的位置，得到的测量数据也送往计算机。计算机根据目标和导弹飞行的数据，算出命中目标所必须的导弹飞行路径。接着由发射机发出指挥导弹飞行路径的信号，导弹上的

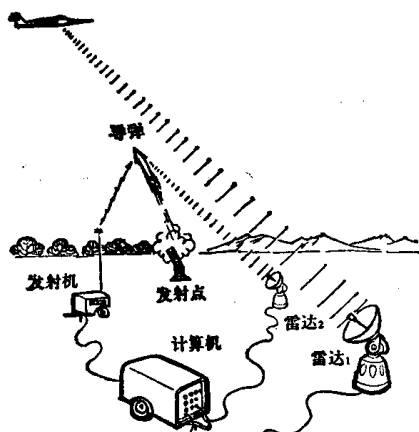


图 29

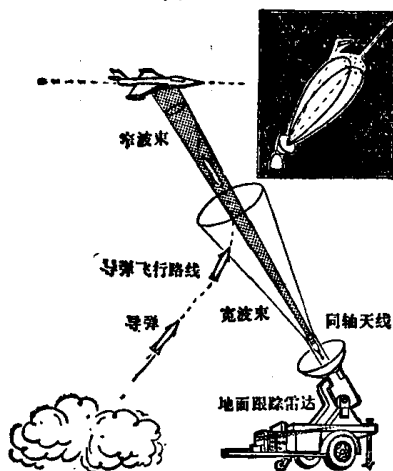


图 30

接收机收到这个信号后，即可用以控制飞行舵，使防空导弹始终朝向目标飞去，直到最后命中为止。

波束式制导系统如图 30 所示，这种系统只用一个地面跟踪雷达工作。它发射出来的波束，一直跟住目标。导弹离开了发射点后，先进入雷达的宽波束；靠导弹上专用的无线电电子设备由宽波束再进入窄波束。窄波束象图 30 右上角所示作圆形运动，形成锥形扫描；导弹即能沿着窄波束中心线飞向目标。

侦察和跟踪洲际导弹

毛主席说：“古代战争，用矛用盾：矛是进攻的，为了消灭敌人；盾是防御的，为了保存自己。直到今天的武器，还是这二者的继续。”洲际导弹在半小时多一点的时间内就可以飞行八千到一万多公里，对于这样的“矛”有没有办法对付呢？是不是可以用雷达来发现它，用防空导弹把它打下来呢？

这在现在已经实现了。可见任何一种新式武器，都可以研究出对付它的办法。

现在已经制成的超远程雷达，能够发现 5000 公里以外的导弹。这种雷达庞大无比，天线装置有足球场那么大，整个设备占地几百亩，工作人员近千人，雷达装在七八层楼高的屋子里，用的电子管有三万多个，

半导体三极管有 30 万个，总的设备重 15 万吨以上。一套雷达简直就象一座大工厂。

对付洲际导弹的防空体系，要由好几套雷达构成，它的工作过程如图31，超远程雷达发现洲际导弹以后

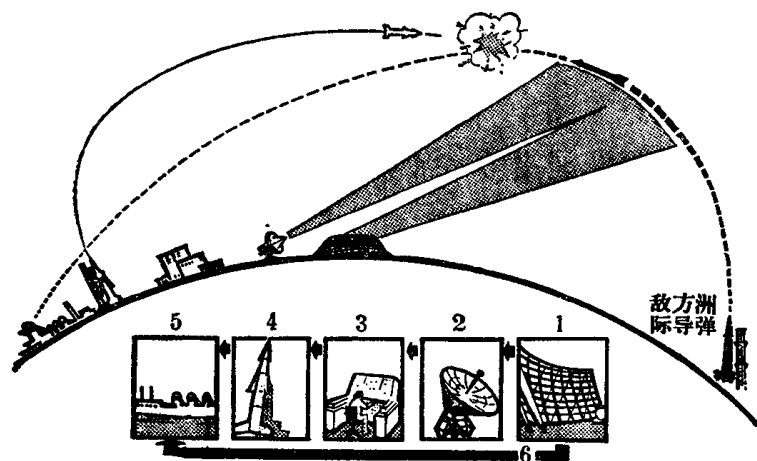


图 31 对付洲际导弹防空体系中所用的雷达示意图

1 超远程雷达 2 精密测量雷达 3 电子计算机推算出敌弹
飞行路线 4 发射防空导弹还击 5 被攻击目标 6 超远程
雷达发现目标的同时发出警报

发出警报，这个雷达发射的波束如图上右方所示。超远程雷达作用距离达 5000 公里，但是精确度不高，因此需要精密测量雷达在 1000 公里左右对洲际导弹进行精密跟踪。然后由电子计算机算出洲际导弹的飞行轨迹，在适当时间发射反导弹导弹。在爆炸点由地面发出无线电信号，使反导弹导弹炸毁来袭的洲际导弹。

这种防空系统实际使用的雷达还有三套没有在图上表示出来：第一套是真假目标区分雷达，因为洲际导弹往往在天空分裂成许多假目标，但是其中只有一个真正带有核武器，所以这种雷达必须能够分辨哪个是真正的导弹头；第二套是目标截获雷达，目标在 2000～4000 公里之间，由这个雷达工作；第三套是反导弹导弹跟踪雷达，专门用来测量反导弹导弹的飞行轨迹，以便准确地命中目标。

什么是雷达网？

雷达网由三个部分组成。第一部分是雷达据点，这是由分布在国境线或海岸线的每隔一、二百公里的雷达所组成。有的雷达据点设在飞机、军舰或飞艇上，有的在海中建造一个人造雷达岛，使雷达据点能够发现更远的目标。第二部分是中心指挥所，由雷达据点送来入侵目标的情报，在这里汇集综合。一般还有电子计算机迅速进行数据处理。第三部分是通信机构，一方面联系各据点至中心指挥所；一方面便于指挥员发布对付入侵目标的命令，由歼击机、防空导弹或高射炮来进行迎击。

雷达的第二代——相控阵雷达的出现

由于洲际导弹的出现，对雷达提出了两个要求：第一是作用距离要远，能发现和测量 5000 公里外的导弹；第二是天线波束要扫描得快，能跟踪速度为音速 20 倍的导弹。对第一个问题只要加大天线面积和增加无线电波的发射功率等就可以做到。但对第二个问题就难于解决，因为一般雷达是天线和波束一起转的。在六十年代初许多跟踪雷达天线直径达 30 米，重量有几十到几百吨，它的惯性很大，旋转起来是很不灵活的，天线转一圈往往要几秒钟。能不能解决这个矛盾呢？毛主席教导说：“**马克思主义者认为人类社会的生产活动，是一步又一步地由低级向高级发展，因此，人们的认识，不论对于自然界方面，对于社会方面，也都是一步一步地由低级向高级发展，即由浅入深，由片面到更多的方面。**”相控阵雷达就是在解决这个矛盾的基础上出现的。相控阵雷达的天线是不动的，而使波束在几个微秒内能转动一圈，即它转动的速度要比机械的转动快 100 万倍左右。

一般雷达天线只有一个辐射元（极少数也有几个辐射元，有一种行列式天线也有几十个辐射元的），辐射元是指一个能辐射无线电波能量的小天线。辐射元

发射无线电波，由天线反射器反射后再发射出去。相控阵雷达的天线有成百上千个辐射元，每个辐射元有一个移相器和它连接，每个移相器可控制辐射元发射出来的无线电波相位。只要根据需要改变各移相器的移相相位，那么由各个辐射元发射出来无线电波相叠加在一起，就会形成一个指向可改变的波束。许多相位不同的波叠加在一起，怎么会使波束方向改变呢？

我们可用水波来解释。轮船在水中航行时，会掀起阵阵波浪，当两个轮船前进时，它们各自形成一组水波。若我们仔细观察两组水波互相叠加的地方，就会发现，有些地方波浪起伏倍加剧烈，而有些地方则几乎没有上下波动，这种现象称为波的干涉。如果两组波频率一样，幅度一样，而且相位相同，那么叠加后幅度增加一倍；如果相位相反，叠加后幅度为零（如图 32）。

如果两个波的波峰一一对应，称相位差为零，一个波峰与一个波谷相对应，称为相位差是 180 度，总之，根据两个波的波

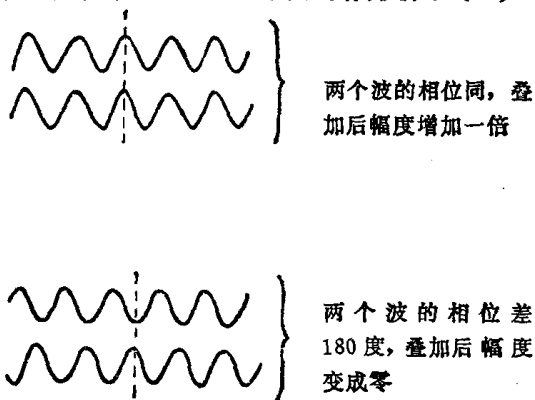


图 32 波的干涉

峰相差，其相位差可由 $0\sim 360$ 度变动。上面例子指两个波叠加，在雷达相控阵天线中用成百上千个辐射元所产生的波相叠加，只要各个移相器相位控制得对，可使形成的总的波束在某一方向，各个波相叠加很强，而在其他方向则互相抵销而很弱，即叠加后总的波束具有方向性。当改变各个移相器移相相位时，就可控制波束的指向。

相控阵的“相控”二字是指天线辐射的无线电波的相位可加以控制的意思。“阵”是指成百上千个辐射元很有规律的整整齐齐按行和列排列着，象一个“阵”一样，相控阵天线的名称由此而来。因此，相控阵雷达的天线，研制的关键在于移相器质量的好坏，现在世界各国都在这上面投入很多的力量。那么多的移相器是不是由人工去控制其相移呢？当然不能，人工反应太慢了，只有利用电子计算机去控制。相控阵雷达为了加速相位控制，一定要和计算机结合起来；为了加速计算目标位置的信息，雷达也离不开计算机。此外，相控阵雷达是具有高度自动化控制的系统，波束的控制和工作参数的改变都是自动完成的。因此，相控阵雷达实际上是雷达技术、计算机和自动控制这三者高度发展和结合的产物。

地面上的相控阵雷达是很庞大的，有的天线安装

在十层楼高大的建筑物内；有的安装在露天中，长的有达 1800 米的。装在飞机上的相控阵雷达，也可以做得很小，重量只有一百多公斤，当然性能要差一些。

人们把相控阵雷达叫做雷达的第二代，它具有下面几个特点：

第一，相控阵雷达具有多功能。一般雷达有的只能远程搜索；有的只能近程跟踪；有的只能控制高射炮；有的只能制导导弹。但相控阵雷达是多功能的，它根据工作的需要，可随时改变工作参数，一部相控阵雷达可替代几部不同类型的雷达。

第二，相控阵雷达可同时跟踪多个目标。一般跟踪雷达只能跟踪一个目标，而相控阵雷达却能同时跟踪几十到几百个目标。目前一个大型舰只往往装有七、八种类型，二三十部雷达，如果用相控阵雷达装备，只要二、三部就够了。

第三，相控阵雷达的天线每一个辐射元可装一个发射管，这样总的发射功率可不受单个管子额定功率的限制，即相控阵雷达在增强发射功率上是容易做到的。

第四，相控阵雷达用计算机算出目标坐标后，可自动显示和传输数据，这样可测得快，精确度也可提高。一般雷达靠人工观测来测距，测量一个目标所需时间

为 20~30 秒,在雷达技术中称为“数据率”低,不能适应测量快速目标的需要。相控阵雷达解决了这个问题。

由于相控阵雷达具有以上几方面的优点,在七十年代初,它已成为雷达设备的主要类型了,而且在海陆空三军中有逐步代替其他雷达的趋势。目前各国还在进一步研究,把相控阵原则不仅用于雷达上,而且用在电子设备(尤其是飞机和舰上),包括了电子侦察、干扰、响应器、导航、甚至把通讯等都综合在一起,用同一个相控阵天线工作。

什么是超视距雷达?

我们知道电离层对波长为 10 米以上的无线电波会产生反射,这对雷达来说是不利的,因为电离层会被误认为是一个目标,因此雷达用波长短于 10 米的超短波。**“事物都是一分为二的”**,近年来,研制出一种超视距雷达,它是利用无线电波在电离层上的反射而使作用距离增加到 4000 公里的,这种雷达还可以比超远程雷达更早地发现贴近地面低飞的导弹和轰炸机(主要指部分轨道式轰炸武器),它在近代防空系统中有重大价值。

首先看一下洲际弹道导弹轨迹和部分轨道式轰炸武器轨迹,如图 33 所示。洲际弹道导弹是按惯性而飞

行的，它要飞得远，在发射时必须飞得高，即它的轨

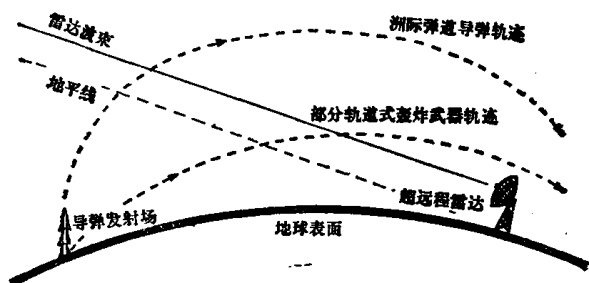


图 33 超远程雷达工作示意图

道是根据惯性有一定规则的。部分轨道轰炸武器是指低飞导弹、轰炸机的飞行轨迹，这种低飞轨迹有一部分按弹道导弹轨迹飞行，但另一部分又故意使它贴近地面飞行，其目的是使超远程雷达发现它时，已飞过了大一半的路程了（如图 33）。超远程雷达在弹道导弹起飞不久就可发现，但发现部分轨道式轰炸武器却要晚得多。因此，目前防洲际导弹的系统中必须研制另一种雷达，能在部分轨道式轰炸武器起飞不久就能发现它，超视距雷达就是为解决这个问题而产生的。

超视距雷达的工作原理如图 34 所示，它发射频率由 2 到 60 兆赫的无线电波，利用电离层反射一次，使作用距离增加到 4000 公里左右；有的反射两次，作用距离还可加倍。导弹发射后，由于它本身喷出高温气体，使大气中气体游离，形成一个很长的电离气体“尾

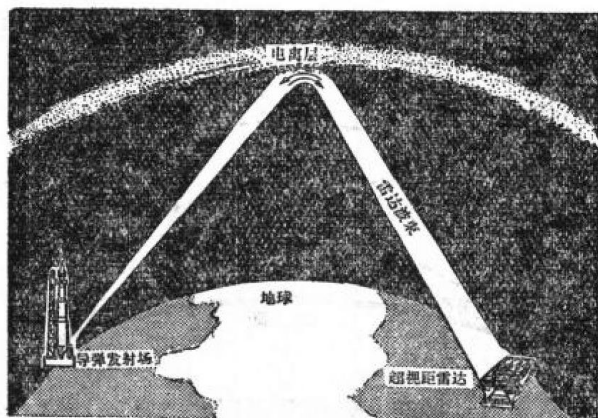


图 34 后向散射超视距雷达工作示意图

巴”，这个“尾巴”对无线电波能产生反射。因此，超视距雷达实际上与一般雷达工作原理相同，不同点在于经过电离层反射一下。这种超视距雷达称为后向散射式，意思是回波经过目标反射又朝后向原来方向回去。另有一种超视距雷达是发射机和接收机分开的，彼此相隔达几万公里，发射机发射的无线电波经过电离层反射后，在另一端由接收机接收。如果在这中间有导弹发射出来，那么电离气体的“尾巴”会扰乱从发射机到接收机之间的无线电波的传播，并由此推断导弹已发射出来。这种雷达称为前向散射式，意思是没有把无线电波朝后反射回去。前向散射式只能发现目标，不能测定其位置，后向散射式能测定目标的方位和距离，因此具有更大的国防价值。

导航的眼睛

雷达不仅是国防中的哨兵，而且也是海洋和空中导航的“千里眼”。近代的海轮和飞机，几乎都是利用雷达来协助导航的。

雷达可以帮助海轮找到航行的方向，当进入港口的时候，又可以借雷达来避免和其他船舶相碰。

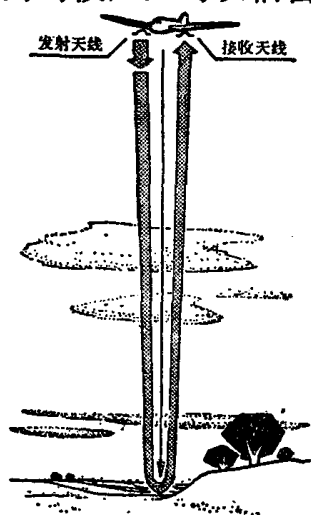


图 35 雷达高度计测量飞机和地面的高度

雷达可以帮助飞机确定飞行的航线，以及飞机在机场的安全起飞和降落。近代的国际机场，都设有导航雷达，来协助指挥飞机的起飞和降落。

目前，每架飞机都装有一个雷达高度计（图 35），用来测量飞机飞行的高度。

雷达还可以测量汽车的行驶速度，并对违反行车速度规定的汽车司机发出警告。

气象探测的新助手

雷达在气象方面，除了在探空气球上应用以外，还可以用来发现雷雨和乌云。雷雨和乌云中含的水滴越

多,对雷达无线电波的反射也就越强,因此,在雷达平面位置指示器上可以直接观测到雷雨和乌云的位置(图36)。



图 36 气象雷达指示器上的亮带是表示云雨的图像

为了保证飞机飞行的安全,现在较大型的客运飞机都装有气象雷达,当飞行员知道了雷雨发生的地点以后,可以及时地绕过这个区域。

雷达和宇宙航行

雷达在宇宙航行中主要用于测量宇宙飞船在空中的精确位置。在地面测量宇宙飞船的位置,为了使测量的距离更远一些,可在宇宙飞船上装置一个收发响应器——它收到地面雷达信号后,发射到地面上一个更强的信号,这比单纯从宇宙飞船上反射产生的信号要强得多。这样,能在八亿公里以上测量宇宙飞船的位置。

近年来载人宇宙飞船登上了月球,这飞船由登月舱和指令勤务舱两部分组成。登月的宇宙飞船不能全部都在月球上降落,因为降落时要减速,回地球起飞时又要加速,消耗燃料太多。在宇宙飞行中,若减少

一公斤的负荷，推动燃料就可少带几千公斤。在宇宙飞船接近月球后，指令勤务舱围着月球外的椭圆轨道转，有点象地球的人造卫星围着地球转一样。同时，重量轻和载人少的登月舱(它是指令勤务舱的一部分)从轨道上降落到月球上。登月舱本身带有小型火箭动力系统，在月球表面上登落时，必须垂直的下降，有四条支撑舱身的“腿”首先与月球表面接触。降落时用两个装在登月舱底下的雷达来完成，一个用来不断地测量离月球表面的高度；另一个用来保持和控制舱身垂直下降。当登月舱离开月球起飞回地球时，先由月球飞行到月球与

指令勤务舱之间的内轨道上(见图37)，然后经过计算机精密计算，确定飞行路径，从内轨道飞向外轨道，与指令勤务舱会合。在宇宙航行中，两个飞

行体的会合必须由另一个装在登月舱顶上的雷达来完成。登月舱由内轨道飞行到外轨道，飞行轨迹是一个椭圆，这不能靠惯性飞行来导航，而一定要由雷达来

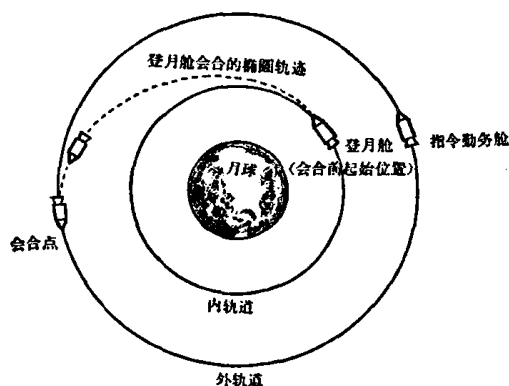


图 37 登月舱从圆形内轨道转换到外椭圆轨道的会合图

完成这个任务。会合时，两个飞行体都在高速运动，后一个必须追上前一个，相遇后飞行员从登月舱走入指令勤务舱后即起程回地球。由此可见会合中对雷达的测量精确度的要求是很高的。

向遥远的空间进军

雷达在天文学中的应用可以分为两个分支：一是射电天文学；一是雷达天文学。射电天文学是依靠大型类似雷达的天线——叫做射电望远镜，接收来自遥远的空间如太阳、行星、恒星、银河系和河外星系的无线电波，研究宇宙各种天体的特性。至于雷达天文学则是从一九四六年用雷达探察月球以后诞生的。

雷达天文学已经取得了不少成就：它能特别精确地测量出星球的距离，测定金星的自转周期，探测太阳，研究流星等等。因此，它已经成为人类征服宇宙空间的不可缺少的工具。

天文学家曾经预言，当人类不仅登上月球，而且进一步能在那里生活以后，由于月球表面重力只有地球的六分之一，又没有风和天气的变化，那里将能十分容易地建造庞大的雷达天线。那时，雷达天文学会发出难以想象的威力，为人类探索宇宙的奥秘作出更大的贡献。

六 后起之秀的多面手 ——激光雷达

激光雷达是利用激光来工作的，它又叫做莱塞雷达。激光是在一九六〇年才开始发现和研究出来的，它在科学和工程技术上带来了一系列崭新的应用，它在近代物理学中的成就仅次于热核反应。激光雷达在国防上的应用仅仅是开始，它可称为名副其实的后起之秀的多面手。

激光和一般光有什么不同？产生激光的装置是怎样工作的？激光雷达又是怎样工作和有什么用处？下面我们就来谈谈这些问题。

原子和发光现象

人们早就知道，自然界中千变万化的物质都是由原子组成的。但是一直到二十世纪初期才发现原子是由一个重的原子核和围绕着原子核旋转的电子组成的。有些元素的电子有好几层，每一层都成为电子运动的轨道，每一层电子具有的能量是不相同的。电子具有的能量数值叫做能级，离原子核近的内层电子能级低，离原子核远的外层电子能级高。例如最简单

的原子是氢原子，它只有一个电子围绕着原子核旋转，电子可以在轨道 1、2、3 上旋转（图 38）。电子在轨道 1 旋转时的能级是最低的，也是原子最稳定的状态；



电子在轨道 2 和轨道 3 旋转时能级高，但是处在不稳定的状态，经常

图 38 氢原子中电子旋转的三个轨道

要跳回到轨道 1 来。

电子在各层轨道上跳来跳去的运动，和物质发光的现象有密切的联系。电子并不是长年累月地在一层轨道上旋转的，当它受到激发，例如受到外界能量的照射，会吸收外界一定的能量，由低能级跳到高能级上去。在 高能级的电子是不稳定的，过了一定的时间，或每当受到外界的激发，又会回到低能级去。电子从高能级跳回低能级的时候，会以电磁波辐射的形式放出多余的能量，形成我们能见到的物质发光现象。

电子从外层轨道向内层轨道运动的时候，放出的一定的能量是一份确定的能量值，而不可能只放出这份能量值的一部分，这说明电子能量的变化是突然的，不是连续的。相反，当电子从内层轨道跳到外面一层轨道的时候，它就要吸收相同的一份能量，这个能量也是确定的一份。这一份份的能量值，就叫做“量

子”。“量子”的能量等于这两个能级间的能量差。由此可见，量子是电磁波能量辐射或吸收的一种形式。当辐射或吸收的电磁波在可见光和红外线、紫外线波段的范围以内的时候，这时的“量子”叫做“光子”。因此我们见到的光，实际上就是原子内部的电子在轨道上跳动而辐射出光子的现象。

我们知道，光有不同的颜色，是由于光波具有不同的频率。例如太阳光是由红橙黄绿青蓝紫七色构成的，红色光波长最长，接近 0.7 微米^①，紫色光波长最短，接近 0.4 微米。那么，原子在辐射光子的时候，为什么会出现不同的颜色呢？这是因为原子中各个能级间电子跳动时辐射出来的光波的波长是不一样的。拿图 38 中氢原子的电子轨道来说吧，电子由第二层轨道跳到第一层轨道能辐射出红光；而电子由第三层轨道跳到第一层轨道却辐射出蓝光。不同的物质也会辐射出不同的光来。因此，光的不同颜色，是由于原子中能级不同的电子跳跃而产生的。

光和原子之间的作用

毛主席教导说：“每一物质的运动形式所具有的特殊本质，为它自己的特殊的矛盾所规定。”为了要理

① 一微米是一米的百万分之一。

解激光的本质，就必须进一步掌握光和原子之间的作用，看一看原子中电子的运动形式和它的特性及其固有的矛盾。

在图 38 中表示，氢原子中电子旋转在三个轨道上，电子在各个轨道上的能量是不同的。当电子受外界激发，从一个轨道运动到另一个轨道上的时候，电子的能量就发生变化，这个能量的变化就反映为整个原子能量的变化。所以在讨论电子在原子中的运动时，通常都不说电子的能量，而只说原子的能量。因此，我们可以把一个原子的能量用能级图来表示，各种原子能级的数是很多的，但为了简便起见，这里

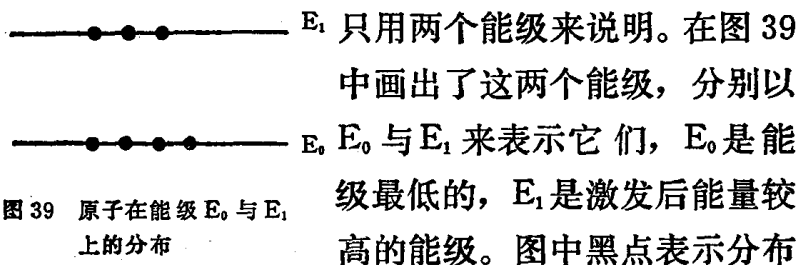


图 39 原子在能级 E_0 与 E_1 上的分布

只用两个能级来说明。在图 39 中画出了这两个能级，分别以 E_0 与 E_1 来表示它们， E_0 是能级最低的， E_1 是激发后能量较高的能级。图中黑点表示分布在这两个能级上的原子数目。最低的能级 E_0 称为基态， E_1 等能级叫做激发态。原子从基态变为激发态，或从激发态返回到基态，称为原子能态的跃迁过程。

原子和光之间的作用可以有三种不同的过程：吸收过程、自发辐射过程和受激辐射过程。

在吸收过程中，开始时原子处于基态能级 E_0 上，

这时有一光子趋近它,如图 40 左边所示。当原子吸收了光子,光子不见了,光子的能量变为原子的能量,原子从



图 40 原子的吸收过程

基态能级跃迁到激发能级 E_1 上去,如图 40 右边所示。

在自发辐射过程中,开始时原子处于激发能级 E_1 上,如图 41 左边所示。后来原子跃迁到基态能级

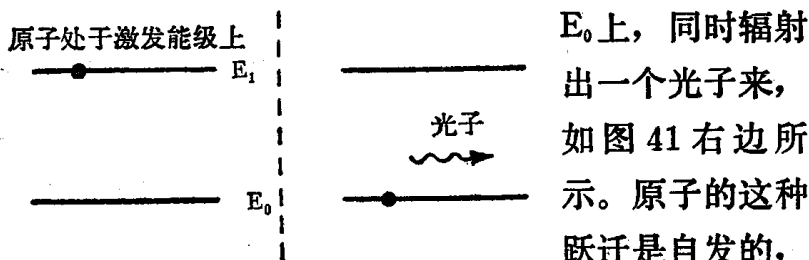


图 41 原子自发辐射过程

E_0 上,同时辐射出一个光子来,如图 41 右边所示。原子的这种跃迁是自发的,并不是受外界的影响。

一般光源的发光都属于自发辐射过程,在这种过程中,每一个发光的原子都是独立的发光体。它们彼此之间毫无联系,自发辐射的特征是具有偶然性,因而它们的发光是杂乱不齐的,发射出来的

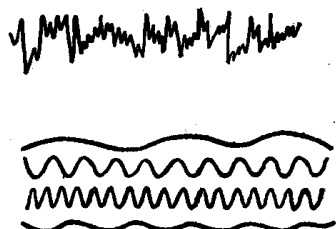
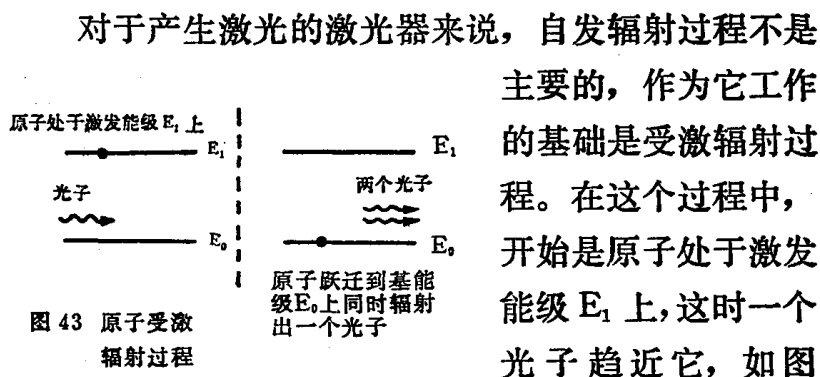


图 42 普通光源产生的非相干光

电磁波是各种不同波长的无秩序的混合。图 42 下方

表示普通光源的振动，这种光源辐射出来的光波的波长和相位杂乱无章，各不相同。这样的光源产生总的振动之和，如图 42 上方所示，这种光叫做非相干光，或叫做非同相光，它是指各个振动波相合时，其相位都不相同的，因此形成杂乱的波形。



对于产生激光的激光器来说，自发辐射过程不是主要的，作为它工作的基础是受激辐射过程。在这个过程中，开始是原子处于激发能级 E_1 上，这时一个光子趋近它，如图 43 左边所示。后来激发态的原子受到光子的刺激就辐射出一个光子来，同时激发态的原子由于丢失了能量而跃迁到基态能级 E_0 上，如图 43 右边所示，这样一来，就有了两个光子了。实际工作中，有更多的原子从激发能级 E_1 跃迁到基态能级 E_0 上，产生的光子会很多，即受激辐射产生的光是很强的。这种过程叫做相

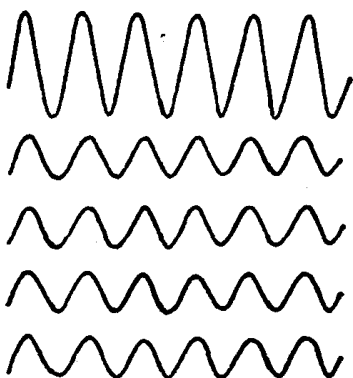


图 44 激光器产生的相干光辐射

干光辐射，或叫做同相光辐射，如图 44 所示。相干光就是激光。由于在相干光源中各个发光源的振动波都是同相位同波长的，因此合成波频率和相位也和原来的一样，而幅度是大大的增强了。

激 光 的 特 点

首先，激光和一般所见到的光在频率上有很大的不同。一般见到的光线，其中包含的频率是大小参差不齐的。这是因为电子由不同的高能级向低能级的跳动是自发的，因此见到的辐射光线具有很多不同的频率，尤其是当发光物质是由不同类型的原子组成的时候，辐射出来的各色各样的频率的光更多。但是激光却不是这样，它是由外界激发单纯的物质而产生的。在激发的过程中可以使辐射在单纯的一个能级间产生，因此可以得到频率一致的光波，这样的光叫做单色光，而一般光实际上是多色光。

其次，激光和一般所见到的光，如前所述，在相位上也有很大的不同。凡是重复来回均匀的运动，都有相位的问题。为了说明这个问题我们举个生活中常见的例子，如划船比赛，船上坐了两排划桨的人，左面和右面的人数一样多，后面有一个人喊口令指挥。要使船笔直地向前行驶，两边划桨的力量就必须相同。

如果左面推动船前进的力量大了，船就会向右行驶，如果右面推动船前进的力量大了，船就会向左行驶。怎样才能做到左右两边推动船的力量相同呢？这就要求左右两排人的划桨的动作和力量完全整齐划一。这不但要求在每一单位时间内划桨的次数左右相同，而且要求每条桨入水、出水的时间也都一样。前者实际上就是指划桨的频率，后者实际上是指相位。当每个人划桨的频率相同的时候，例如每分钟划 50 次，可是桨的入水、出水时间不一样，有先有后，那就是说相位不同，这时船的左右推动的力量也不会相同。所谓激光，也就是运用这种原理产生的。当辐射物质中的各原子辐射电磁波的时候，不但要频率相同，而且要波的振动在相位上相同，一同开始一同结束，这时发出的光就叫激光。由于一般见到的光，电子由高能级向低能级的跳动是自发的，跳动的时间有先有后，因此不可能同相位。但是激光是由受激辐射而产生的，电子跳动的时间是受到控制的，因此，辐射的相位和频率是相同的。激光的名称来由就是指光是受激而产生的。

能量集中的细波束和全息术在 激光雷达中的应用

激光和一般光最显著的不同，是能把光聚成很细的波束，而且在照向空间的过程中，细波束发散变粗的现象不很严重。波束的发散是指随着射出距离的增加，波束越来越粗。例如激光照射到三、四百公里以外的场所，波束直径大约可保持在30米左右。假设探照灯能够照射到同样远的距离，波束直径要达到80公里以上。同样的距离对雷达来说，波束直径也要达到10公里以上。又比如对30多万公里远的月球来说，激光照射上去，波束的直径只有三公里多，而无线电波的波束直径却会达到四万多公里。激光只需要很小的反射透镜，就可以得到极细的光束。例如用激光雷达要得到射出40公里远、保持直径为60米的波束，只要用几个厘米大小的透镜就行了；如果用探照灯，那么反射器的直径要在150米以上。从地球照射到月亮上一平方公里的区域，如果用波长为一厘米的微波，定向天线的直径就要达三公里，可是目前还造不出这样大的天线；而用激光，反射透镜只要20~30厘米左右就可以了。激光的波束不易发散与其空间和时间相干性有关，这里就不论述了。

把波束聚得很细有很多好处，首先是能量集中了，作用距离可以大大增加；波束越细，越能看清目标的轮廓。利用激光雷达可以看清飞机或导弹的形状，这对于识别和分清真假导弹头是十分重要的。

在七十年代初还进行了激光“全息术”的研究，如能在激光雷达中使用，还能看到目标的立体图形。“全息术”目前已实现的是全息照相，它利用来自同一激光源的两个光束在目标上反射后进行照相。它利用了光的相位干涉现象，因此在底片上出现了干涉花纹。再把底片用激光照射，人眼就可以看到底片上记录的物体图像。这个物体看起来有立体感，如果这个图像中有一扇半开的门，当你把头移动一下，就会看到被门挡着的东西，这是真正的立体图像。因此，全息照片所记录的不仅是光波的强度，而且还有光波的相位，但普通照片只能记录光的强度。全息照相就是记录了光的全部信息的意思。这种全息照相不能“现照现看”，要经过曝光、显影等手续。目前，已研制成只需几分钟就能显示的设备，但结构还比较笨重，只能装在陆地上。全息术不仅可以应用在激光雷达中，而且还可以应用在一般的微波雷达中。

奇妙的激光器

激光器又叫做莱塞，它是产生激光的装置。以人造红宝石激光器（图 45）为例，它的主要部分是一枝

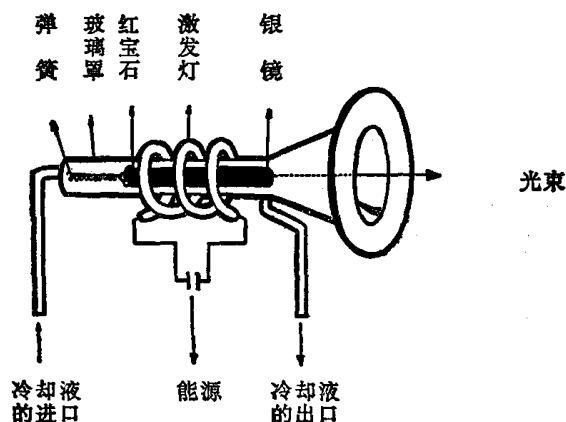


图 45 激光器的结构

和铅笔一样粗的人造红宝石，在红宝石的两个端面上经过抛光和镀上银层，形成两个反射性能良好的银镜。银镜的中央各有一个微小的细孔。红宝石棒用一个内部为镜面的罩包住，并且在周围充满冷却液。在红宝石棒的周围还装有一个用玻璃管盘旋的脉冲氙气灯。在氙气灯间歇地加上电压以后，会发出一闪一闪的明亮的光，其中所含的绿色的光对激光器的工作有特别重要的作用。这个氙气灯叫做激发灯。

要了解激光器的工作原理，先要了解红宝石的原

子结构。人造红宝石是用人工方法，在氧化铝中掺入少量铬原子制成的。铬原子的电子主要有三种能级，平常处在基态能级，电子由能级甲1可以跳到最高激发能级甲3上去(图46)。但是铬原子在

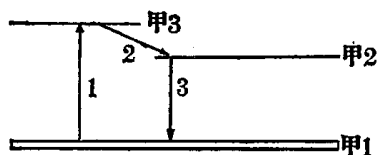


图 46 铬原子的三个能级

稳定的，会自发地转移到中间能级甲2上。跃回到甲2上的电子，虽然能量较原来的低了一些，但还是不稳定的，不过要从甲2跳回甲1是比较困难的，一定要有外界能量使它产生受激辐射才行。如果在红宝石左端的小孔加上一个微弱的红光，就会使很多铬原子受到激发，辐射出红光而使电子跳回低能级甲1。红宝石两端镜面的作用使发出红光的光子在两端间反射多次，更易于促使铬原子中的电子由甲2跳回甲1。这种由少数光子引起许多原子的辐射，叫做链式反应，或者叫做雪崩现象。雪崩现象是指激发由少数原子开始，一个引起两个，两个引起四个，最后引起所有的原子激发。如果关闭红宝石左端的小孔，那么只要红宝石内部有一个铬原子由于自发辐射而跳回到低能级，所发出的红光，由于反射镜的作用，也会引起链式反应，这时红宝石就成了激光的光源产生器了。

电子在铬原子中的三个能级中跳动产生激光的道

理，可以拿跳水运动员的例子来说明。假如有三个跳水运动员走上跳水台，跳水台越高表示能量越大，当他们走到最高处（图 47·2）的时候，相当于铬各个原子中的电子受到激发处于最高能量甲 3 上。当他们走到跳板上（图 47·3）的时候，相当于各个铬原子中的电子由甲 3 回到甲 2 上，当裁判员鸣枪的时候，三个运动员一齐跳入水中（图 47·4），表示铬原子中的电子由甲 2 回到甲 1。运动员走上跳台有先有后，但是跳下来是同时的，好比是具有同相的意思。

激光器能够工作，使处于激发态的原子产生受激辐射，首先就得把处于基态能级的原子，激发到高能级

去。如何将它们从基态激发到高能级去呢？对于红宝

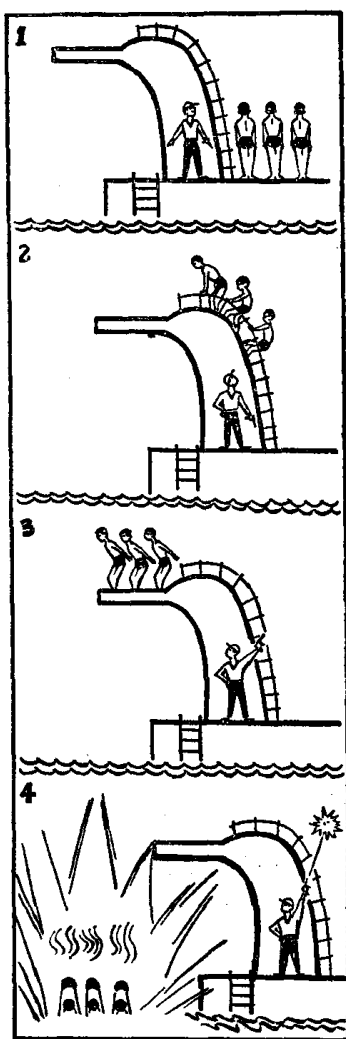
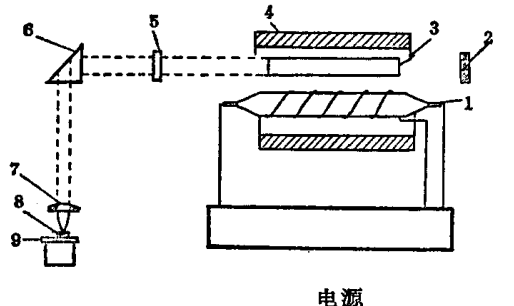


图 47 激光的产生和游泳跳水台上运动员的跳水情形相比

石激光器，就是用光照的方法，即用脉冲氙灯照射给它以光能，把红宝石中铬原子从基态激发到高能级。

自无产阶级文化大革命以来，在毛主席革命路线指引下，我国在通讯、机械、仪表、纺织、建筑、冶金、气象、造船以及医疗等方面都开始应用激光技术。



1 氙灯 2 全反射介质膜 3 激光元件 4 聚光器 5 半反射介质膜 6 转角棱镜 7 聚焦透镜 8 工件 9 工作台

图 48 利用激光打孔机对宝石轴承打孔

例如有一种激光打孔器，结构示意图如图48所示。图中的激光元件就是红宝石棒，红宝石棒两个端面的银镜，一端是百分之百反射，不让激光漏出来，称为全反射介质膜；另一端只允许一小部分透射出来，叫做半反射介质膜，激光就从这里射出。激光器最外面有一个圆柱形聚光器，它使受激辐射在红宝石棒纵轴方向上最强，亦即提高它的辐射效率。氙灯电源装置就是供给铬原子的激发能量。采用这种打孔机在手表的宝石轴承上打孔，使工效提高10倍，孔径大小均匀，质量稳定，又减轻了劳动强度。

激光器除了采用红宝石以外，也可以采用其他晶

体，或惰性气体、金属蒸气以及某些液体，辐射出来的激光可以是绿光、蓝光、荧光以及红外线等。近年来，还制成了砷化镓半导体激光器，这是效率最高体积最小的激光器，最适合军事上的应用。在气体激光器中，通过电子与原子的碰撞，使气体原子从基态激发到高能级。有些液体激光器用化学分解或化合的方法；半导体激光器用电能直接加到 P—N 结的方法，把能量加进去，使原子从基态激发到高能级。不同类型的激光器，使原子从基态激发到高能级所采用的方法也往往不同的。

激光雷达的应用

激光雷达在国民经济中，可以作为测量距离的仪器，图 49 是它的外形结构：一个圆筒内是产生激光的激光器，另一个圆筒内装有接收透镜，可以接收反射回来的激光。测量原理完全和雷达相同，也是用指示器观察发射脉冲

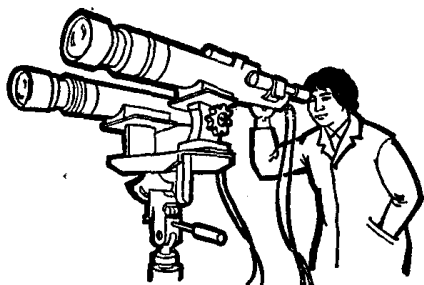


图 49 激光雷达

和回波信号之间的时间。由于激光雷达的发射和接收都是光波，因此，它收到的回波信号，要用一种光电

管把光变成电，然后才能在指示器上显示出来。目前已经制成的激光雷达中有能测 30 公里以内目标距离的，它的精度在几米左右，重量只有 10 公斤。

在六十年代初，曾经用激光雷达得到了月球的回波信号。这种激光雷达的全部仪器并不很庞大，但输出脉冲功率达 500 兆瓦，在月亮上形成的发射信号波束直径为 3.2 公里，在 30 多万公里的长距离上，距离精度为 45 米。

装置在大型客机上的激光雷达，发射脉冲功率为 10~20 兆瓦，能录下 12 公里高处的卷层云和 34 公里高处的积云，而且可以发现离飞机相当远的湍流，这对于一般气象雷达来说是做不到的。有许多飞机的遇险事故，都是由于大气的湍流而导致的，飞行速度越高，危险性越大。由此可见，在航行中有了激光雷达来探测气象以后，可避免许多事故的发生。现在大型喷气客机的飞行速度多在两倍音速以上，这个问题显得特别重要。

激光雷达在宇宙航行中具有十分重要的应用价值，因为它能够把激光聚成很细的波束，这样，它可以充分利用发射的能量。一个激光器输出细波束的能量的集中程度，大大超过近代大功率的雷达输出。激光雷达还比雷达具有更高的精确度。根据计算：平均

输出功率为 66 瓦的激光雷达，可以探测两个相距为 16,000 公里的宇宙飞船的距离，精确度可以达到十万分之一，激光雷达的重量轻，消耗能量小，都是雷达不能相比的。

目前已经制成的宇宙航行中两个飞行器在会合时需用激光雷达，能使一个飞船追踪另一个飞船，最后逐步靠拢会合。这种激光雷达作用距离在 120 公里时精确度为 ± 1 米，而在近距离 3.2 公里时精确度可达到 ± 10 厘米，而测量方向的角精确度在 ± 0.03 度左右，其总重量只有 16 公斤。

在一九七二年制成的一种激光雷达高度计，利用脉冲测距的原理，曾用来测量月球表面形状和起伏。

还有一种在七十年代制成的激光雷达，用以监视月球表面上行走的宇宙航行员的位置。宇宙航行员在月球上行走时，装置在宇宙航行车上有一个电视摄影机自动地对准这个航行员，以便把它工作情况由电视信号传送到地球上来。这个电视摄影机没有人去控制，它有一个小型激光雷达自动对准宇宙航行员，在宇宙航行员身上又有一个激光反射器，激光照射到宇宙航行员身上这个反射器能使反射大大增强。由于宇宙航行员走不远，测量距离只要求一公里以内，但其测距精度为 ± 1 米，测角精度为 \pm 千分之一弧度。这

种雷达用半导体砷化镓激光器，接收用硅光电二极管，它的重量和体积十分轻小。

激光雷达最重要的用途之一，是在军事上用来精密地跟踪飞机和导弹。目前，人们还在进一步研究，如何利用激光高度集中的能量，照射在导弹上，把导弹击毁。图 50 是设想的装置，就是用微波雷达进行

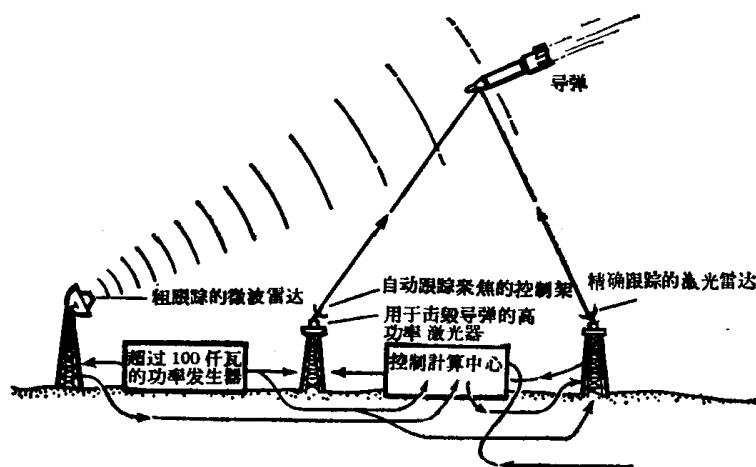


图 50 激光雷达在反导弹系统中的作用

粗略跟踪，用激光雷达进行精确跟踪，然后使一架高功率的激光器产生的激光照射在导弹上，把导弹击毁。根据试验，激光功率密度可以达到每平方厘米一百万瓦到 10 亿瓦，用它照射到碳块上，几乎在万分之五秒时间内就能将这一照射点加热到摄氏八千度以上，能很快的把它烧毁。这种装置目前还在大力研究

中，当前主要的问题是输出功率还不够大。近年来研究出一种气动激光器，是用空气动力使所用介质达到出光条件，进而从中引出激光的装置，它是属于气体激光器的一种，输出连续功率已达 200 仟瓦，而一般二氧化碳激光器输出连续功率只有 100 瓦。据估算输出功率要再增加约 1,000 倍，即连续功率达到几百兆瓦以后，才能造成击毁导弹的激光器。

激光雷达在军事上有着广泛的应用。例如歼击机为了能贴近地面 30 米飞行，避免给对方警戒雷达的发现，过去往往在机上装有障碍回避微波雷达，但只能发现高大建筑物和山丘等，不能识别出电线杆，空中电线、高塔和烟囱等其他障碍物，应用激光雷达后能察觉这些细小的目标。这种激光雷达目前成为新式歼击机的标准装备之一。

此外，激光雷达也可以用来侦察海底的潜水艇。由于它发射的光束截面小、能量大，因而测量的精确度可以大大提高，但目前它的作用距离在海洋中也只有几公里，和声纳差不多，有待于进一步改进。

激光雷达的优点和缺点

激光雷达的应用有一点不及雷达，就是它在云雨烟雾中不能工作。大气中水蒸汽、氧气和二氧化碳等

对激光雷达使用的红外波段吸收和衰减很大，使激光雷达的作用距离不能很远。目前只有大沙漠地带经常保持晴朗无云，因此，侦察远距离目标激光雷达的装置地点大大受到了限制。当然这个缺点对宇宙航行来说却没有影响，因为高空中是没有云雨烟雾的。目前，人们正在设想，把激光雷达和高功率的激光器都装在人造卫星和宇宙飞船中，用来侦察和歼灭导弹。甚至进一步加大激光波束密度，使它能摧毁照射途径中的云雾水滴和其他粒子，那么它就可以和雷达中的无线电波一样，在云雨烟雾的气象条件下也能发挥作用了。

总之，激光雷达具有很多优点：主要是测距、测角精确度高，设备小而轻，有的能显示目标图像，还可利用多普勒效应测量快速及慢速运动目标的速度。但激光雷达目前还处在发展阶段中，有许多问题并没有解决。主要的缺点是：输出功率小，工作效率低，接收机器件灵敏度低，激光器可靠性差，工作不稳定等。这些，都有待于今后的进一步改进。

七 结 束 语

声纳、雷达和激光雷达分别利用了超声波、无线电超短波和激光波，显示了各式各样的本领和用途。

声纳出现的历史有六十年，雷达出现的历史近四十年，激光雷达虽然在六十年代初刚出世，但是不能因为它的年龄小而忽视它。它是后起之秀的多面手，在某些场合，它可能代替声纳和雷达的工作。在不久的将来，我们还会看到它有更广泛的应用，尤其是在国防和宇宙航行上。

伟大领袖毛主席教导我们：“**人类的历史，就是一个不断地从必然王国向自由王国发展的历史。这个历史永远不会完结。**”声纳、雷达和激光雷达从出现到现在已取得一些惊人的成果，但是这方面的科学技术还在不断地发展中，尤其是雷达和激光雷达，目前还在大力研究中。它们的工作体制、测量方法和所用电路及元件等还有待进一步改进。电子计算机的广泛采用和半导体集成电路的出现，以及自动控制技术的发展，引起这三种设备在测量方法和结构上的重大变化。至于激光雷达，目前仅处于发展阶段的初期，它的潜力和应用在目前还不能估量哩！

伟大领袖毛主席指出：“**中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。**”解放以来，尤其是从无产阶级文化大革命以来，我国广大工农兵和科学技术人员，发扬了“**自力更生**”，“**艰苦奋斗**”的革命精神，使我国声纳、雷达和激光雷达技

术得到了迅速的发展,并取得了很大成就。可以坚信,沿着毛主席革命路线奋勇前进的中国人民,必将在认识自然和改造自然的过程中有更大的飞跃,获得更大的自由,对于人类做出更大的贡献。