



雷 达 技 术 小 丛 书

雷 达 扫 描

〔苏联〕B. M. 斯捷潘诺夫著



國防工業出版社

雷 达 扫 描

〔苏联〕B. M. 斯捷潘诺夫著

姚承业译



国防工业出版社

1965

內 容 簡 介

本书系苏联军事出版社出版的《雷达技术小丛书》之一。本书的讀者对象是雷达技术軍官，但其他有志于詳細了解雷达机各組件和元件的工作人員亦可从中获得教益。

书中敘述選擇雷达扫描系統的参数的几种主要設想，并以一些最为典型的扫描系統为例作了較詳細的說明。

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ОБЗОР

〔苏联〕Б. М. Степанов

ВОЕНИЗДАТ 1959

雷 达 扫 描

姚 承 业 譯

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₃₂ 印張2 41千字

1965年4月第一版 1965年4月第一次印刷 印数：0,001—4,100册

統一书号：15034·737 定价：(科六)0.26元

目 录

引言	5
基本原理	7
若干符号和定义	7
角坐标的分辨率和测量精确度	12
对扫描周期的战术要求	15
最小扫描周期	19
相对扫描周期	24
扫描方式	28
圆周扫描	28
扇形扫描	30
针状方向图扫描	30
锯齿形扫描	32
螺旋扫描	34
螺旋扫描	35
步式锥形扫描	37
旋转锥形扫描	38
锥形扫描	39
不同扫描方式的综合运用	41
方向图移动的控制	43
整部天线的移动	43
镜式天线辐射器对反射器焦点的移动	48

双鏡式天綫	53
鏡式天綫綫式輻射器各部分間相位关系的变化	54
天綫裝置中鉄氧体的运用	58
天綫的稳定	62

引 言

任何雷达在搜索目标时都对一定的空域进行扫描。在雷达技术中目标的位置通常用球面坐标系来表示，座标的原点即为雷达的位置。表示目标位置的座标有三，即：斜距、方位角和高低角。雷达所观测的空域，习惯上以对目标的最大探测距离、方位扫描区和高低角扫描区来表征。

一般情形下，雷达天线方向图在水平面和垂直面上的张角均甚小于在该平面上所需的扫描范围。因此，为了能够探测目标，雷达方向图应能在给定的空域内移动。方向图按照一定的规律所作的移动，习惯上就称作雷达对空间的扫描。

对扫描系统的基本要求如下：

扫描时不遗漏目标，换句话说，电磁波应辐射到给定的空域的任一点；

对给定的空域进行扫描时，扫描的延续时间应当很短。因为，如果扫描延续时间较长，在相连的两次辐射时间内，目标已经作了甚大的位移（尤其在目标速度大时更是如此），因而其标志在荧光屏上便会发生“跳动”的现象，使对目标的观测不易进行；

在每次对目标辐射时，到达目标的脉冲的数目应不少于一定的数值。只有这样，目标的显示才确实可靠；

保证对目标座标的探测达到一定的精确度，保证有必要的角座标分辨率；

扫描装置的结构应当简单轻便，不应产生过大的机械负

荷。

上述要求是相当复杂的，而且相互間存在着矛盾。因此，在設計雷达时，扫描系統的設計是較為困难的一項課題。

本书叙述有关選擇扫描系統的参数的一些問題，并介紹几种最为典型的扫描系統。

基本原理

若干符号和定义

为了表征雷达所探测的空域及所测定的目标的坐标，通常采用下列符号（图1）：目标方位角—— β ，目标高低

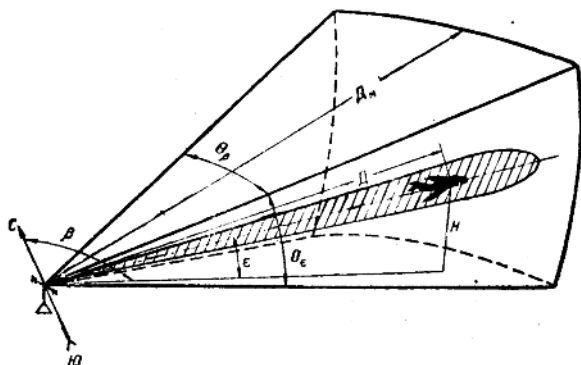


图1 扫描区和空间目标的坐标。

角—— ϵ ，斜距—— D ，目标高度—— H ，方位角扫描区—— θ_β ，高低角扫描区—— θ_ϵ ，最大探测距离—— D_{mo} 。

方向图在水平面和垂直面上的张角分别以 Φ_β 和 Φ_ϵ 表示。

倘方向图与最大发射方向对称，且可以关系式 $\Phi_\beta \approx \Phi_\epsilon = \Phi$ 来表示，则称为针状方向图●。针状方向图的张角可能很小($\Phi = 2^\circ \sim 3^\circ$)，也可能很大($\Phi = 20^\circ \sim 25^\circ$)。

● 詳見 В. И. 別凱托夫著“超高频天线 (Антенны сверхвысоких частот)”一书，苏联军事出版社1957年版。

不对称的方向图，即一个平面上的張角甚大于另一个平面上的張角的方向图，称作平面方向图。图2所示为两种典型的平面方向图。

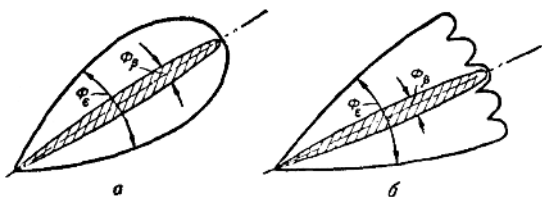


图2 平面方向图：
a—扇形图；b—瓣状图。

扫描周期 ($T_{\text{осн}}$) 为天线方向图連續两次通过空間某一定点时所需的時間值。

如果对空間的扫描依照一定的复杂的軌迹进行 (例如图3所示之鋸齿形扫描)，那么方向图运动軌迹間两相邻部分的最大角便称作方向图的步 (Ψ)。

为使雷达能在規定的時間內观测一定的空域，必須要求方向图以相当的角速度 (Ω) 移动，該角速度的瞬时值等于轉角 φ (参看图3) 除此轉角轉动之時間 t ：

$$\Omega = \frac{\varphi}{t} \text{ (度/秒)。} \quad (1)$$

輻射時間 ($T_{\text{осн}}$) 为目标位于方向图張角內的時間。根据上述方向图的移动的角速度的定义，輻射時間可用下式表示：

$$T_{\text{осн}} = \frac{\Phi}{\Omega} \text{。} \quad (2)$$

在对目标輻射的期間內，由目标反射回 n 个脉冲信号。

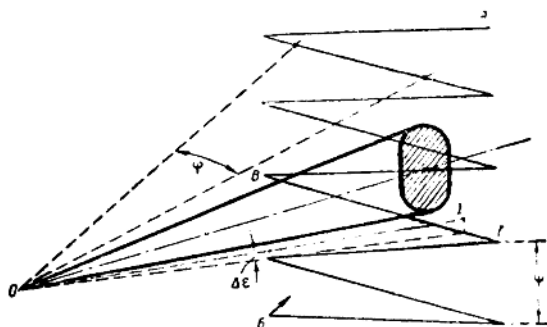


图3 锯齿形扫描。

从减小扫描周期的要求出发，应当力求减少脉冲的数目 n 。脉冲的数目最少时可以是 1。但是为使目标的显示比较可靠，在每次对目标辐射时，由目标反射的脉冲的数目，不应少于一定的数值 $n_{\text{мин}}$ ，此值的大小视雷达所采用的显示装置的型式而定。当雷达中运用辉度标志距离扫描显示器时， $n_{\text{мин}} \approx 5 \sim 6$ 。

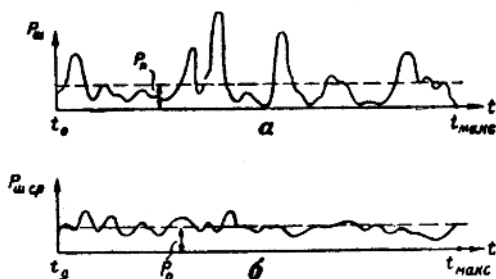


图4 接收机输出端噪声功率的变化：
 a —接收机输出端的噪声； b —四周内噪声平均功率。

現在我們來說明一下，為產生目標標誌必需有足夠數目的回波脈衝的道理。當發現目標時，回波脈衝信號在接收機固有噪声本底上顯示出來。上述噪声功率接近於自己的平均值而不斷變化。圖 4 a 所示為接收機輸出端噪声功率的變化情形；這裡時間 t_0 相應於搜索脈衝的發射瞬間，而時間 t_{max} 則相應於距離掃描的結束。在某些瞬間，噪声功率可能顯著地增大，而在另幾個瞬間里則又會下降至零。如果經一定的延續時間而測定的噪声功率平均值為 P_0 ，則在任意瞬間噪声功率超過給定值 P 的概率 $[\omega(P)]$ 可用下式表示：

$$\omega(P) = e^{-\frac{P}{P_0}} \quad (3)$$

例如，超過噪声平均功率五倍的噪声峰值功率的概率，便約略等於 1%，亦即：大約在一百個噪声中會有一個噪声功率超過 P_0 五倍以上。

如果目標的標誌僅僅由一個脈衝信號加於顯示器而產生，那末為了在噪声本底上可靠地顯示出目標，就要求回波信號的功率必須超過 P_0 。這樣的要求就會使雷達發現遠方目標的可能性大為減小，換言之，就是減小了雷達的探測距離。

假使在每次對目標輻射時，接收到幾個回波信號，那末就能更好地在熒光屏上觀察目標的回波標誌了。這是由於目標的回波脈衝大都具有恒定的幅度，同時脈衝來到的各個瞬間相應於電子束在熒光屏上某一定的位置，而噪声在熒光屏上的位置卻全是變化無常的。

在幾個回波脈衝的作用下，顯示器熒光屏上目標標誌輝度 B 的增長，可以用圖 5 來予以說明。標誌的輝度是逐漸增長的：在第一個回波脈衝到達後，輝度相當於 B_1 ；在第二個

脉冲到达后，輝度相当于 B_2 ，余此类推。标志的最大輝度 B_0 取决于諸重叠的脉冲的数目和这些脉冲的功率 P_n 。与此相仿，在噪声脉冲的作用下，荧光屏的另外的点上輝度也有所增加，只不过在这样的点上产生輝光的噪声功率总是变化无常罢了。

假定荧光屏某些点上的輝度在雷达工作的 n 周内逐渐增长（即如通常所說，在扫描的 n 周内，信号在积分着），而經 n 周后扫描在显示器荧光屏上所作的位移的值相当于亮点的直徑，那末目标标志輝度与噪声本底間的关系，便可用諸信号的功率 P_n 与 n 周内噪声平均功率 $P_{m.ep}$ 之比来表示。图46上繪有扫描四周內噪声功率的平均值。如图所示，噪声功

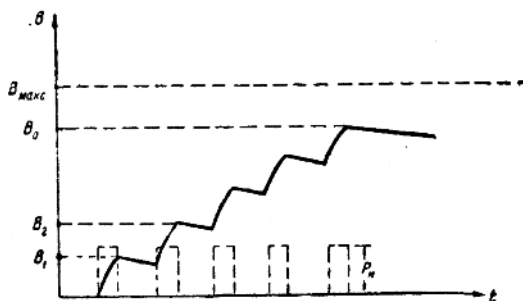


图5 在几个脉冲作用下荧光屏上标志輝度的增长。

率的此一数值甚近于 P_0 。在5~6周内噪声功率的平均值 $P_{m.ep}$ 则更加近于 P_0 ；而为了能可靠地发现目标，只須实现如下的条件：

$$(P_n)_{\text{max}} \approx 1.5P_0. \quad (4)$$

如繼續增大扫描的次数，便不会获得多大的效果，因为 $n \rightarrow \infty$ 时 $P_{m.ep} \rightarrow P_0$ ，而 $(P_n)_{\text{max}}$ 則总須大于 P_0 。上述情形表

明 $n_{\text{МНН}}$ 应为 5~6 的原因。

如果不是通过对显示器荧光屏的观测，而是采用计算机在噪声本底上析出信号，那么，将 $n_{\text{МНН}}$ 减至 1~2 是可行的，亦即可以在最大的程度上减小扫描周期。

角坐标的分辨率和测量精确度

测定目标方向时通常采用最大值法。最大值法的实质是，根据方向图最大值指向目标时的天线的位置来测定目标方向（图6）。如果雷达中采用幅度标志显示器，则可按照标志幅度

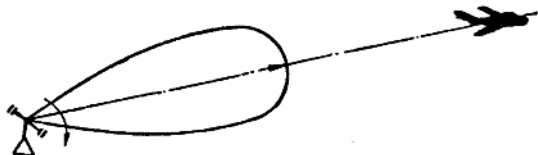


图 6 最大值法测定目标方向。

最大的瞬间判知目标方向（图 7 a）；而当运用辉度标志显示器时，则按照标志的中心来定向（图 7 b）；定向时借辅助的准线装置进行。

用最大值法测定坐标时，精确程度不高，这是由于在靠近最大值处，方向图的曲率很小（参看图 6），因之准确地测定最大值指向目标的瞬间或准确地判定标志的中心都是几乎不可能的。可以大略地认为：用最大值法测定角坐标时，其误差值约为方向图张角的 20~25%。假如方向图的张角等于 5° ，那么角坐标的平均测量误差大约为 1° 。在搜索目标时，这样的角坐标测量误差是完全可以容许的。但是倘若雷达的

任务是保证对活动目标进行射击瞄准，那么对角座标测量精度的要求就要高得多。

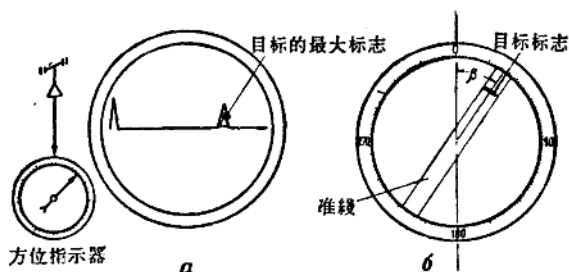


图7 最大值法测定角座标时荧光屏上标志的显示：

a —采用幅度标志时； b —采用辉度标志时。

习惯上常用密位来表示角度测量精确度，亦即以弦 r 和夹角边 A 的比值来表示角度（图8）。当角度不大时，其弦 r 和弧 l 大抵相等，那么表示角度时，可以不用密位（ $\alpha_{r,A}$ ），而改用度（ α° ）：

$$\alpha^\circ = \alpha_{r,A} 57.3。 \quad (5)$$

例如，一个 $\alpha_{r,A} = 0.005$ 的角，用角度的单位来表示则大约为 $18'$ 。

为保证瞄准任务的进行（例如保证由地面对接近 SCR-584 雷达的飞机进行射击），目标角座标的平均测量误差应不超过 $1.5 \sim 2.0$ 密位，亦即在 0.1° 左右。要达到这样高的角座标测量精确度，用最大值法是不行的。

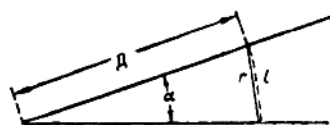


图8 用 $\frac{r}{A}$ 的比值来表示角度 α 。

此外，还须补充的一点是，用最大值法定向时，角座标

的测量精确度还取决于方向图运动的方式。这一关系可以用前面曾经提及的锯齿形扫描为例来予以说明。设天线方向图截面的中心沿折线 AB 移动(参看图3), 这时目标方位角的测量精确度要高于高低角的测量精确度。这是由于方向图在水平面上的位移较为均匀, 而在垂直面上的位移则比较陡急。

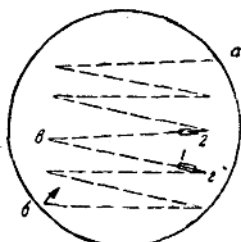


图9 方位角—高低角显示器目标角座标的读取。

我们来研究一下方位角—高低角显示器上目标角座标的显示。在扫描的同时, 电子束在显示器荧光屏上的位移轨迹为折线 ab (图9)。假设目标位于点1(参看图3), 那么当方向图在轨迹的 BT 段移动时, 目标就被辐射到。目标的标志1(参看图9)则位于显示器荧光屏上电子束轨迹的 ab 段。方位角的测量精确度取决于标志1中心的读取精确度。在目标高低角的测量中, 通常还会有附加误差 $\Delta\delta$ (参看图3), 此误差的产生是因为荧光屏上电子束所作的垂直方向的位移(亦如方向图在空间一样)不是均匀的: 电子束或则居于点1(参看图9)或居于点2, 而不能占据1、2两点之间的位置。

要求高度精确地测定目标方向时, 常运用等强信号法。如所周知, 等强信号法的实质是: 由方向图的位移产生很窄的等强信号区, 位于等强信号区中的目标, 不管方向图的位置如何, 所反射的回波信号皆具有相等的幅度。为了测定目标方向, 我们可以转动天线, 使目标出现在等强信号区

为止。

通常可以使等强信号区指向目标，来达到很高的精确程度。一般地可以认为：在用等强信号法测量角坐标时，误差约为方向图张角的 $2\sim 3\%$ 。但应当说明的是，同最大值法相比较，等强信号法测定方向时所需的时间要长得多。

在设计雷达扫描系统时上述情况都是应予注意的。

雷达方位角和高低角分辨率分别与方向图在水平面和垂直面上的张角有关，同时还取决于显示器荧光屏上亮点的大小。亮点的大小通常用角度单位表示。在大多数情形下，方向图的张角甚大于亮点的角尺寸，因之可以认为雷达的分辨率取决于方向图的宽度。但在环视显示器上的中心部分会有例外；因为这里亮点的角尺寸大于方向图的张角。

对扫描周期的战术要求

在设计雷达时，常竭力减小其扫描周期。这是因为在绝大多数情况下，所发现的目标对雷达站都作相对的位移，因之在扫描一周所经的时间内，目标与雷达的相对位置就发生了变化。

如图10所示，设雷达站配置在 O 点，目标在 A 点，目标位移的速度为 v 。位移方向与至达雷达站方向的夹角为 α 。位移速度 v 可以化成分速度：

一为 v_p ，与方向 AO 重合，可表示目标距离的变化的速度；另一为 v_r ，与 AO 直交，可表

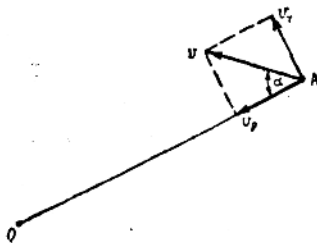


图10 目标对雷达所作的位移。

征目标方位的变化的速度。在扫描一周間，目标距离的变化可用下式表之：

$$\Delta \bar{A} = v_p T_{0.63}, \quad (6)$$

而目标方位的变化則为：

$$\Delta \beta \approx \frac{v_r T_{0.63}}{\bar{A}} 57.3, \quad (7)$$

式中

$$v_p = v \cos \alpha,$$

$$v_r = v \sin \alpha.$$

应当将目标座标的变化与显示器荧光屏上的标志尺寸加以比較，該尺寸用距离刻度值和方位刻度值表示。荧光屏上运动目标标志的位置不断变化。倘在扫描一周內目标的位置 ($\Delta \bar{A}$ 和 $\Delta \beta$) 小于相应的标志尺寸，那末后者便能均匀地在荧光屏上移动；否則标志便将出现“跳动”的现象。

我們援引一个例子来加以說明。設目标标志在地面警戒雷达 AN/CPS-6 的环視显示器荧光屏上移动。該雷达的作用距离为 300 公里，方向图在水平面上的張角为 1.5° ，扫描周期为 10 秒，脉冲宽度为 1 微秒。

首先用刻度值测定显示器荧光屏上目标标志的尺寸。如所周知，在磁控式电子射线管中可将描繪目标标志的光点的直径 (d_n) 减小到管子直径的 $1/300$ 。这就是說，管子的直径 (d_{rp}) 如果表 $\bar{A}$ 公里，那么按照距离刻度来测定，亮点直径相当于 $\frac{\bar{A}}{300}$ 公里。在上例中管子的半径应表 300 公里，亦即直径表 600 公里，因之亮点直径表 2 公里。由于雷达发射脉冲的宽度为 1 微秒，亦即相当于 150 米的距离，那么标志的距离尺寸便决定于亮点的值。