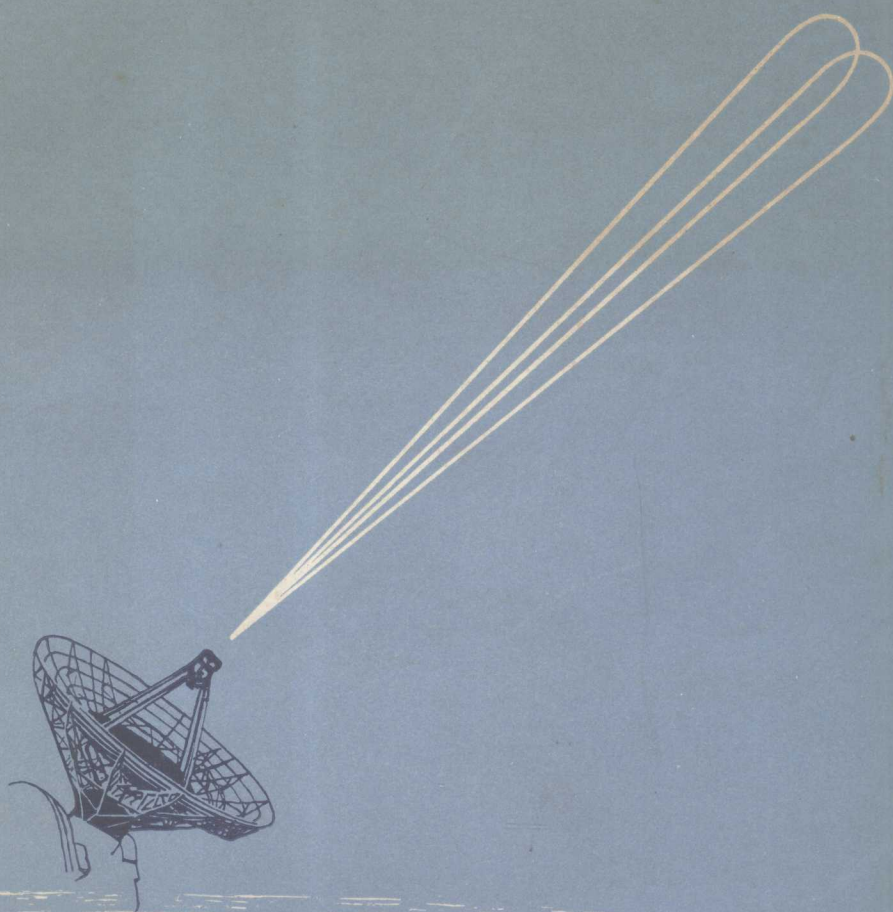




单脉冲雷达

国防工业出版社

单脉冲雷达

〔苏〕A. И. 列昂诺夫等 编

黄 虹 译

国防工业出版社

1974

内 容 简 介

本书较系统地介绍了现代单脉冲雷达的工作原理，各部件的设计和制造方法，并分析了雷达诸参数以及抗干扰等问题。

可供有关工人、工程技术人员、大专院校师生参考。

МОНОИМПУЛЬСНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ
А. И. ЛЕОНОВ, К. И. ФОМИЧЕВ
ИЗДАТЕЛЬСТВО "СОВЕТСКОЕ РАДИО" 1970

*

单脉冲雷达

[苏] А. И. 列昂诺夫等 编

黄 虹 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张13¹/₂ 314 千字

1974年12月第一版 1974年12月第一次印刷 印数：0,001—6,800 册

统一书号：15034·1386 定价：1.40元

目 录

译序	4	5-5 由目标噪声及接收机噪声所产生 的总定向误差	102
第一章 单脉冲雷达的原理和方法	5	5-6 自动增益控制对定向精度的影响	102
1-1 单脉冲的定向原理	5	5-7 回波信号的极化失真对定向精度的影响	107
1-2 单脉冲雷达系统的结构图	7	第六章 接收支路各单元的非理想性对 单脉冲雷达测角精度的影响	115
1-3 自动跟踪单脉冲雷达系统	11	6-1 主要的仪器误差来源	115
1-4 单脉冲搜索雷达系统	16	6-2 天线方向图的不完善对单脉冲雷达定向 精度的影响	115
1-5 在两个平面内定向的单脉冲雷达的构成原理	18	6-3 单脉冲雷达接收支路幅-相特性 的不一致性对定向精度的影响	121
1-6 连续辐射及准连续辐射单脉冲 雷达的构成原理	23	6-4 在采用宽频带连续及准连续信号时, 对接收 支路幅-相特性一致性的附加要求	133
第二章 单脉冲雷达系统的天线	24	6-5 减少仪器定向误差的方法	135
2-1 天线方向图及其表面电流分布的关系	24	第七章 单脉冲雷达的抗干扰性能	147
2-2 抛物面天线	26	7-1 干扰雷达的方法	147
2-3 带副反射器的抛物面天线	28	7-2 对单脉冲雷达系统的干扰	152
2-4 透镜天线	30	7-3 单脉冲雷达防止某些无线电干扰的方法	163
2-5 镜面天线的交叉极化辐射	32	第八章 用模拟方法来研究单脉冲雷达的 测量误差	165
2-6 定相阵列天线	36	8-1 一般的问题和模拟的方向	165
2-7 单脉冲雷达天线的辐射器	37	8-2 振幅和-差式单脉冲跟踪雷达的模型	165
2-8 方向图最大值的偏移角和相位中心之间 的距离的选择	43	8-3 振幅定向法调频信号单脉冲搜索雷达 模型的总方框图	172
2-9 对信号进行和-差处理的波导元件	44	8-4 振幅-振幅式及振幅和-差式单脉冲搜索 雷达的模型	184
第三章 角度鉴别器的基本功能部件	46	第九章 单脉冲雷达的应用范围及某些 单脉冲雷达的主要性能	188
3-1 对数放大器	46	9-1 跟踪洲际及宇宙空间目标的单脉冲雷达	188
3-2 鉴相器	55	9-2 跟踪卫星和宇宙飞行器及与之保持通讯 联络的单脉冲雷达系统	193
3-3 自动增益控制系统	58	9-3 反导弹系统中的单脉冲雷达装置	198
第四章 单脉冲雷达的角分辨能力 与定向灵敏度	63	9-4 防空火控单脉冲雷达	202
4-1 角分辨能力的概念	63	9-5 机载单脉冲雷达	204
4-2 单脉冲雷达的角分辨能力	66	9-6 在地物干扰背景中发现地面 目标的单脉冲雷达	209
4-3 单脉冲雷达的定向灵敏度	74	参考文献	211
4-4 提高单脉冲雷达角分辨能力的方法	75		
第五章 单脉冲雷达的测角精度	83		
5-1 无线电波传播条件对定向精度的影响	83		
5-2 回波信号的振幅起伏及角起伏对定向 精度的影响	85		
5-3 接收机内部噪声对定向精度的影响	94		
5-4 在采用相控阵天线的单脉冲雷达中接收 装置内部噪声所产生的定向误差	99		

译 序

单脉冲雷达是在五十年代初期出现的一种精密跟踪雷达。它的测角精度大致比二次大战中获得普遍应用的圆锥扫描雷达高一个量级，同时，这种雷达获取数据率的速度较快，并具有一定的抗干扰性能。随着航空及火箭技术的迅速发展和跟踪洲际导弹及人造地球卫星等宇宙飞行器的需要，单脉冲雷达在六十年代期间曾获得了较大的发展。为了适应国内的需要，我们翻译了苏联列昂诺夫等人编写的“单脉冲雷达”一书，供有关同志在工作中参考。

原书共分九章，前八章分别介绍了单脉冲雷达的原理和主要功能单元。讨论了单脉冲雷达的测量精度和角分辨能力。叙述了用电子计算机来模拟单脉冲雷达系统的方法，分析了单脉冲雷达的抗干扰性能。最后一章则简要地介绍了单脉冲雷达的应用范围和英美某些单脉冲雷达的战术参数。由于原书是在五年前编写的（1970年出版），对于近年来有关单脉冲雷达方面的报导均未收入，故在翻译过程中对原书进行了一些增补，主要的有：在第二章中编写了一小节“五喇叭辐射器”（2-7-4节）；将第九章9-1，9-2，9-3及9-4节进行了增补和改写，并增加了9-5节（机载单脉冲雷达）。

由于我们思想和业务水平有限，此中译本还有不少错误和不妥之处，恳切地希望读者批评指正。

译者

第一章 单脉冲雷达的原理和方法

1-1 单脉冲的定向原理

目标的定向，即测定目标的方向，是雷达的主要任务之一。

直到不久以前，在精密地自动测定信号源的方向方面，应用最广的方法一直是圆锥扫描法、线性（平面）扫描法和方向图连续转换法，它们都是用单支路（或称通道）的定向器来定向的。根据这些方法，信号源的方向是在将方向图不同的天线所连续收到的信号加以比较而确定的。

上述三种定向法还有一个特点，就是目标的角信息体现在回波信号的振幅调制中。这时，回波信号的调制深度就确定定向误差的大小，相位则确定天线轴对目标的偏离方向。

因为用调制方法来形成角误差信号时，需要接收一系列的回波脉冲，所以这种定向法对于因目标有效反射面积随机变化而产生的回波信号的振幅起伏是很敏感的。这就是用波束作圆锥扫描和线性扫描或利用方向图进行连续转换的单支路定向法的最严重的缺点之一。

近来，广泛地采用了单脉冲定向法。使用这个方法时，只需要一个回波脉冲，就可以给出目标角位置的全部信息。这也就是“单脉冲”（一个脉冲）定向这一术语的来源。因为在单脉冲雷达中，只用一个脉冲来定向，所以回波信号的振幅起伏不会对角坐标的测量精度产生显著的影响。

多路接收是实现单脉冲定向的技术方法。因此，单脉冲定向的原理就在于用几个独立的接收支路来同时接收目标的回波信号，然后再将这些信号的参数加以比较。通常，对每个定向坐标平面都要采用两个独立的接收支路：方位平面内两个支路，俯仰平面内两个支路。

最初，单脉冲定向法是用来对目标进行自动精密跟踪的，现在，在单脉冲搜索雷达中也获得了应用。所谓单脉冲搜索雷达，是指这样一种雷达，无论其波束扫在空间的什么位置上，一切目标，只要它是处在方向图范围内，而且又在距离上能分辨开来，此雷达即可将它们的角坐标测定出来。在单脉冲搜索雷达中，一般是采用电扫描波束，并且与电子计算机配合使用。利用电子计算机，按选定的扫描方式对波束在空间的位置进行程序控制，同时测定处于波束内的全部目标的坐标，并画出它们的运动轨迹。

根据从回波信号中提取目标的角信息方式的特点，可以将单脉冲定向法分为两种基本的方法：振幅定向法和相位定向法。

在振幅定向法单脉冲雷达中，为了确定一个平面内的角坐标，就须要形成两个互相叠交的天线方向图，并且它们的中心线对等强信号方向偏离的角度分别为 $\pm\theta_0$ (图 1-1)。图 1-1 表示的是俯仰平面内的两个方向图。当目标在 A 点，并且对等强信号方向的偏离角为 θ 时，由下面的方向图收到的信号将大于由上面的方向图收到的信号。两个信号的振幅差即表示目标对等强信号方向的偏移量，而振幅差值的符号则表示等强信号方向相对于目

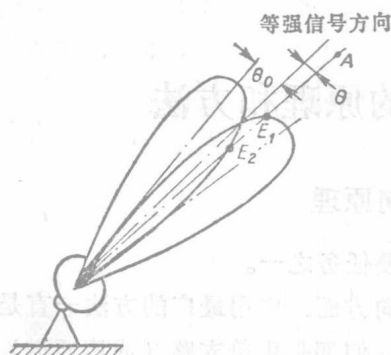


图1-1 振幅定向法单脉冲雷达中角座
标的测定

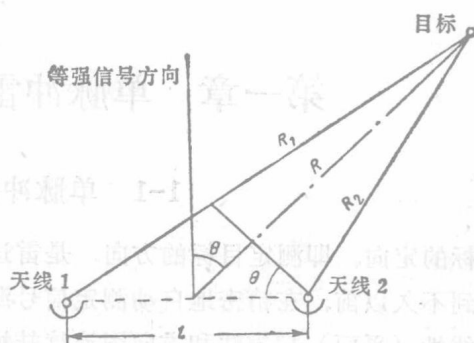


图1-2 相位定向法单脉冲雷达中角座
标的测定

标的偏离方向。当等强信号方向与目标重合时，由上及下方向图收到的回波信号的振幅相等，其差值就等于零。同样，目标的方位座标也可以利用接收机的方位支路和方位平面内的第二对方向图来测定。

在相位定向法单脉冲雷达中，是将两个天线所收到的信号的相位加以比较来确定目标在一个坐标平面内的方向。在遥远的区域内，两个天线都照射着同一空间范围。因此，由点目标反射回来的信号，实际上是振幅相同，而相位不同。图 1-2 表示了两个彼此之间距离为 l 的天线。

在两个天线的连线 l 上作中垂线（即等强信号方向），目标观测线与此垂线之间的夹角为 θ 。天线 1 同目标之间的距离为：

$$R_1 = R + \frac{l}{2} \sin \theta$$

而天线 2 同目标之间的距离为：

$$R_2 = R - \frac{l}{2} \sin \theta$$

目标到两个天线的距离差为：

$$\Delta R = R_1 - R_2 = l \sin \theta$$

由此求得相位差为：

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{2\pi l}{\lambda} \sin \theta \quad (1.1)$$

式中 λ —— 波长。

利用这个公式，可以根据两个分开的天线所收到的回波信号的相位差来确定到达角 θ 。

公式 (1.1) 还说明，信号的相位差 $\Delta \varphi$ ，不仅在 $\theta = 0$ 时为零，而且在符合以下条件的其他 θ 值时也等于零：

$$\theta = \arcsin \frac{2n\pi}{k_\lambda l}$$

式中 $n = 1, 2, \dots$,

$$k_\lambda = \frac{2\pi}{\lambda}$$

因此, 定向特性曲线就是一条符号交替变化的曲线, 除具有基本的等强信号方向外, 还具有很多个虚假的等强信号方向。这就是在采用相位定向法时, 测量的结果具有非单值性的原因。但是, 如果虚假的等强信号方向是处于方向图的主瓣以外, 测量的非单值性就不会成为很严重的问题。为了做到这一点, 须使两个接收天线的中心之间的距离不得超过其中任一个天线的直径。这种天线系统可以用两个并排放置的天线来实现。

除了上述两种基本定向方法外, 由两种方法合成的振幅-相位定向法 (或称为综合法)^[11, 41, 45]也得到了应用。

在上列各种定向方法中, 分别利用由独立支路所收到的回波信号之间的振幅关系、相位关系及振幅-相位关系来作目标角位置的信息源。由于提取角信息的方法不同, 所以对回波信号的处理方法也就不同, 从而使整个单脉冲雷达系统的结构也有差异。下面我们就来研究单脉冲雷达的一般结构图。

1-2 单脉冲雷达系统的结构图

如上所述, 在单脉冲雷达系统中, 目标的角位置信息是将回波信号加以成对地比较而得到的。在进行这种比较时, 单脉冲雷达测角系统的输出电压同回波信号的振幅绝对值无关, 而只取决于信号的到达角。单脉冲雷达的定向特性应当指出回波信号到达角的大小和符号, 即定向特性应为信号到达角的实数奇函数。包含在成对信号中的到达角的原始数据, 是单脉冲天线在接收信号时构成的, 所以又把天线称为角度传感器。

根据上述原理, 应对回波信号进行适当的运算, 以便能够获得这样的一个函数, 该函数的实部将能满足对定向特性所提出的要求 (与信号的强度无关, 并对等强信号方向呈非偶性)。

我们再来讨论所提出的问题的各种可能解答^[41, 45]。接收点的场强的复数式可用时间 t 的函数表示:

$$\dot{E}(t) = E_m \exp i(\omega t - \varphi_0) \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.2)$$

式中 E_m —— 场强振幅;

ω —— 角频率;

φ_0 —— 场的起始相位。

天线系统的方向图是角度的复函数, 它可以用以下的关系式表示:

$$\left. \begin{aligned} \dot{f}_1(\theta) &= F_1(\theta) \exp i \varphi_1(\theta) \\ \dot{f}_2(\theta) &= F_2(\theta) \exp i \varphi_2(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

式中 $F_1(\theta)$ 及 $F_2(\theta)$ —— 振幅方向图;

$\varphi_1(\theta)$ 及 $\varphi_2(\theta)$ —— 相位方向图。

可以认为, 相位方向图是以等强信号方向为对称线的相互镜象图, 而振幅方向图则是两个完全相同并且最大值偏离等强信号方向 $\pm \theta_0$ 角的图象, 即:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(\theta) &= \frac{1}{2} \varphi(\theta), & \varphi_2(\theta) &= -\frac{1}{2} \varphi(\theta) \\ F_1(\theta) &= F(\theta_0 - \theta), & F_2(\theta) &= F(\theta_0 + \theta) \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

式中 $\varphi(\theta)$ ——天线系统的差相位方向图。

可将两个分开放置的天线所收到的回波信号写为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1(t, \theta) &= \dot{E}(t) f_1(\theta) \\ \dot{E}_2(t, \theta) &= \dot{E}(t) f_2(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

于是两个回波信号的比值可写为:

$$r_m(\theta) = \frac{\dot{E}_1(t, \theta)}{\dot{E}_2(t, \theta)} = \frac{\dot{f}_1(\theta)}{\dot{f}_2(\theta)} = \frac{F_1(\theta) \exp i \varphi_1(\theta)}{F_2(\theta) \exp i \varphi_2(\theta)} \quad (1.6)$$

我们把上面这个关系式称为相乘式。在一定条件下, 可以用它来作为构成定向特性的原始关系式。

此外, 还可以用差信号与和信号的比值来构成定向特性:

$$r_a(\theta) = \frac{\dot{E}_1(t, \theta) - \dot{E}_2(t, \theta)}{\dot{E}_1(t, \theta) + \dot{E}_2(t, \theta)} = \frac{\dot{f}_1(\theta) - \dot{f}_2(\theta)}{\dot{f}_1(\theta) + \dot{f}_2(\theta)} \quad (1.7)$$

上式通常称为回波信号的相加式。信号的相乘式与相加式之间的关系由下式确定:

$$\left. \begin{aligned} r_a(\theta) &= \frac{r_m(\theta) - 1}{r_m(\theta) + 1} \\ r_m(\theta) &= \frac{1 + r_a(\theta)}{1 - r_a(\theta)} \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

除相乘式及相加式外, 还可以组成一些别的关系式, 同样能满足对单脉冲雷达的定向特性所提出的要求。例如, 在将相乘式及相加式各乘以复常数

$$\dot{a} = a_0 \exp i \psi_0$$

之后, 便得到一组线性变换式^[45]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{r}_m(\theta) &= \dot{a} r_m(\theta) \\ \bar{r}_a(\theta) &= \dot{a} r_a(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

用以求得回波信号的和与差的装置, 或将回波信号与系数 $\dot{a}$ 进行乘法运算的装置称为变换器, 因为通常可以在其中进行信息的变换, 即将振幅关系变换为相位关系或者相反。这些变换通常是在高频上用无源器件进行的, 因为无源器件比较简单, 性能也稳定。

已变换或尚未变换的两个信号的比值关系的计算, 必须在信号经过前置放大之后才能进行。包含放大器及能得出相乘式或相加式比值并构成定向特性的比较电路等等有源器件的装置, 称为角度鉴别器。

在振幅定向法时, 角信息包含在振幅方向图 $F_1(\theta)$ 及 $F_2(\theta)$ 中。在这种情况下, 如果相位方向图相同, 则相乘式及相加式便只由振幅方向图来表示:

$$\left. \begin{aligned} r_m(\theta) &= \frac{F_1(\theta)}{F_2(\theta)} = \rho(\theta) \\ r_a(\theta) &= \frac{F_1(\theta) - F_2(\theta)}{F_1(\theta) + F_2(\theta)} = \frac{\rho(\theta) - 1}{\rho(\theta) + 1} \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

在相位定向法时, 如果振幅方向图相同, 则角信息包含在相位差中:

$$\varphi(\theta) = \varphi_1(\theta) - \varphi_2(\theta) \quad (1.11)$$

相乘式及相加式只由相位方向图表示:

$$\left. \begin{aligned} r_m(\theta) &= \frac{\exp i \varphi_1(\theta)}{\exp i \varphi_2(\theta)} = \exp i \varphi(\theta) \\ r_a(\theta) &= \frac{\exp i \varphi_1(\theta) - \exp i \varphi_2(\theta)}{\exp i \varphi_1(\theta) + \exp i \varphi_2(\theta)} = i \operatorname{tg} \frac{\varphi(\theta)}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

我们将振幅比 $\rho(\theta)$ 及相位差 $\varphi(\theta)$ 称为角度相乘函数, 将比值 $\frac{\rho(\theta)-1}{\rho(\theta)+1}$ 和 $\operatorname{tg} \frac{\varphi(\theta)}{2}$ 称为角度相加函数。

当角度鉴别器是利用角度相乘函数来构成定向特性时, 如果只对回波信号的振幅关系起作用, 则此鉴别器叫做振幅角度鉴别器; 如果是只对回波信号的相位关系起作用, 则叫做相位角度鉴别器。当利用角度相加函数来构成定向特性时, 如果对于信号的振幅及相位关系都起作用, 则此角度鉴别器就叫做和-差角度鉴别器。

这样一来, 就只能有三种不同的测角方法 (三种类型的角度鉴别器): 振幅法、相位法和和-差法。每种方法都可以用于振幅定向法、相位定向法或是综合定向法。因为每一种定向方法都可以与任何一种角度鉴别器配合使用, 所以总共有九种基本的单脉冲雷达系统, 其分类见表 1-1^[45]。

表 1-1

测角方法 (角度鉴别器的类型)	三种定向方法的基本单脉冲雷达		
	振 幅 法	相 位 法	综 合 法
振幅式	振幅-振幅	相位-振幅	综合振幅
相位式	振幅-相位	相位-相位	综合相位
和-差式	振幅和-差	相位和-差	综合和-差

根据上述分类, 今后在提到单脉冲雷达的名称时, 第一个词表示定向的方法, 第二个词表示角度鉴别器的类型。例如, 对于装用振幅角度鉴别器的单脉冲雷达, 在用振幅定向法时, 称为振幅-振幅式单脉冲雷达; 在用相位定向法时, 称为相位-振幅式单脉冲雷达。对于装用相位角度鉴别器的单脉冲雷达, 在用振幅定向法时, 叫做振幅-相位式单脉冲雷达; 在用相位定向法时, 叫做相位-相位式单脉冲雷达。对于装用和-差角度鉴别器的单脉冲雷达, 根据所用定向方法的不同, 分别称为振幅和-差式单脉冲雷达, 相位和-差式单脉冲雷达或综合和-差式单脉冲雷达。

在表 1-1 列出的九种单脉冲雷达中, 实际上应用最广的有四种: 振幅-振幅式 (AA), 相位-相位式 (ΦΦ), 振幅和-差式 (ACP) 及相位和-差式 (ΦCP)。这四种单脉冲雷达将在下面分别加以讨论。

根据单脉冲雷达的工作顺序, 其结构图应包括以下三个基本的部件 (图 1-3):

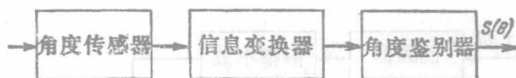


图 1-3 单脉冲雷达的方框图

(1) 角度传感器, 用以产生关于目标角位置信息的信号 (角位置信息包含在信号各参数的相互关系式中);

(2) 信息变换器, 用以变换信号参数之间的相互关系;

(3) 角度鉴别器, 用以提取信号参数比值的实函数 (实函数与回波到达角之间为单值

对应关系)。

作为单脉冲系统中最重要部件的天线就是角度传感器,它的一些特点将在第二章中详细讨论。

单脉冲雷达的信息变换器是移相为 $\pi/2$ 的移相器,它可以进行与 $\pm i$ 相乘的乘法运算。此外,还采用和-差变换器作为信息变换器,一般用的是波导环形桥或双 T 接头,这些装置也将在第二章中讨论。

角度鉴别器的三种方框图分别示于图 1-4 到图 1-6。在每个方框图中,两个接收支路中的中频信号都是用同一个本机振荡器来形成的。这样就能保持两个信号的对称性和信号相位之间的相干性。表征回波信号到达方向的相乘式 $r_m(\theta)$ 或相加式 $r_a(\theta)$ 是由图中放大器的归一化特性所形成的。

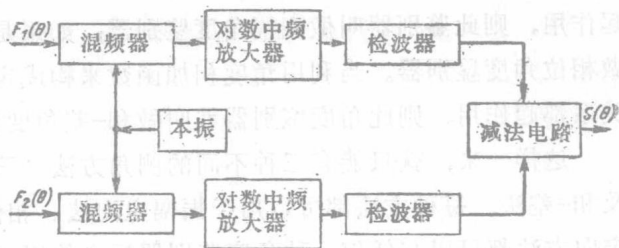


图1-4 振幅角度鉴别器的方框图

在图 1-4 所示的振幅角度鉴别器中,当将两个信号振幅的对数值相减后,即可获得相乘式 $r_m(\theta)$,这相当于对比值取对数。由于两个信号振幅对数值的相减,所以输出电压与回波信号的绝对值无关。在等强信号方向上($r_m(\theta)=1$),对数式 $\ln r_m(\theta)$ 等于零,并对于这个方向呈奇对称,因而可以利用该式求出定向特性曲线:

$$S(\theta) = \text{Re} \ln r_m(\theta) = \ln |u_1(t, \theta)| - \ln |u_2(t, \theta)|, \quad (1.13)$$

式中 $|u_1(t, \theta)|$ 和 $|u_2(t, \theta)|$ ——接收放大支路输出端的信号振幅,它是时间和定向角误差的函数。

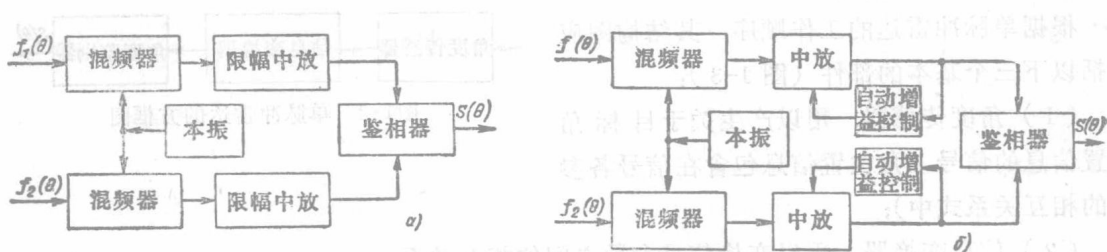
放大器输入信号之间的相位差对相乘式 $r_m(\theta)$ 并无影响,因为在将这些信号振幅的对数值相减以前,已经对信号进行了检波。

在相位角度鉴别器中,当对信号进行归一化处理时,必须消除振幅调制。为此,可以采用限幅放大器(其输出端的振幅与回波信号的振幅无关)(图 1-5 a),也可以在两个支路中采用独立的自动增益控制 (APY) 电路(图 1-5 b)。为了求出定向特性,可以利用由公式 (1.12) 所确定的函数 $-i r_m(\theta)$, 因为其实部为:

$$S(\theta) = \text{Re}[-i \exp i \varphi(\theta)] = \sin \varphi(\theta) \quad (1.14)$$

其中并不包含振幅之间的相互关系。

在和-差角度鉴别器中,相加式 $r_a(\theta)$ 的关系是由两个支路中的自动增益控制来保证,



(a) 用限幅进行归一化; (b) 用自动增益控制进行归一化。

自动增益控制的电压则是由和信号所形成(图 1-6)。其结果就是和信号与差信号的振幅都按照和信号的振幅进行了归一化。

这时, 可以利用角度相加函数来获得定向特性。在两个接收支路相同的情况下, 如果是用振幅定向法, 则定向特性为:

$$S(\theta) = \operatorname{Re} \frac{j_1(\theta) - j_2(\theta)}{j_1(\theta) + j_2(\theta)} = \frac{F_1(\theta) - F_2(\theta)}{F_1(\theta) + F_2(\theta)} \quad (1.15)$$

如果是用相位定向法, 则定向特性为:

$$S(\theta) = \operatorname{Re} \frac{e^{i\varphi_1(\theta)} - e^{i\varphi_2(\theta)}}{e^{i\varphi_1(\theta)} + e^{i\varphi_2(\theta)}} = \operatorname{tg} \frac{\varphi(\theta)}{2} \quad (1.16)$$

研究了单脉冲雷达系统的结构图以后, 我们再来对实际中最常用的一些单脉冲雷达系统进行较详细的介绍。

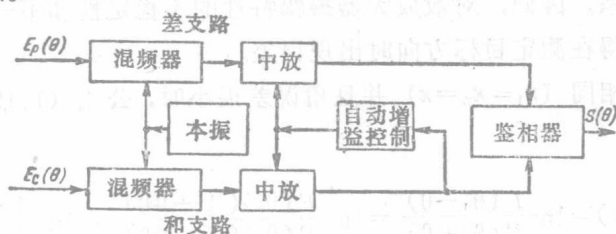


图1-6 和-差角度鉴别器的方框图

1-3 自动跟踪单脉冲雷达系统

1-3-1 振幅-振幅式单脉冲雷达

正如在 1-1 节中所指出的那样, 在振幅定向法单脉冲雷达中, 对目标回波信号进行接收的是这样一种天线系统, 它在每个座标平面内部产生出对于等强信号方向偏离 $\pm\theta_0$ 角的两个波束 (图 1-1)。

在各个独立的接收支路中, 信号的振幅又发生差异, 是与跟踪误差有着直接的关系, 跟踪误差越大, 振幅差异也越大。当跟踪误差等于零时, 两个支路所收到的信号的振幅就彼此相等。因此, 设法使天线系统旋转, 当转到回波信号的振幅相等时, 就实现了目标的定向。

在一个平面内定向的振幅式单脉冲雷达的简化方框图示于图1-7。这种雷达是利用对数放大器来进行信号振幅的归一化的。

如果加在天线系统输入端的目标回波信号为 $\dot{E}(t) = E_m e^{i\omega t}$, 则当目标偏离等强信号方向为 θ 角

时, 经由第一及第二支路传输到天线输出端的信号, 可由下式确定:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1(t, \theta) &= E_m F_1(\theta) \exp i\omega t = E_m F(\theta_0 - \theta) \exp i\omega t \\ \dot{E}_2(t, \theta) &= E_m F_2(\theta) \exp i\omega t = E_m F(\theta_0 + \theta) \exp i\omega t \end{aligned} \quad (1.17)$$

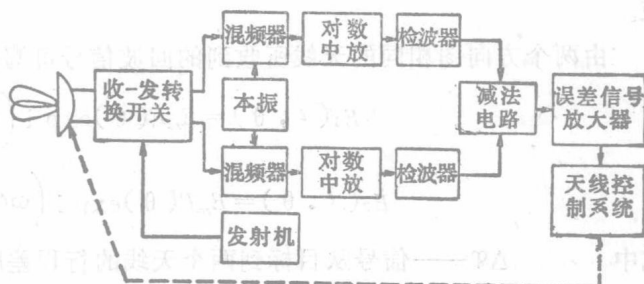


图1-7 在一个平面内跟踪目标的振幅-振幅式单脉冲雷达的方框图

经过变频、中频放大和线性检波之后，加到减法电路输入端的信号分别为：

$$\begin{aligned} u_1(\theta) &= \ln \kappa_1 E_m F(\theta_0 - \theta) \\ u_2(\theta) &= \ln \kappa_2 E_m F(\theta_0 + \theta) \end{aligned} \quad (1.18)$$

式中 κ_1 及 κ_2 ——两个支路的信号传输系数。

在减法电路的输出端，得：

$$s(\theta) = \ln \frac{\kappa_1 F(\theta_0 - \theta)}{\kappa_2 F(\theta_0 + \theta)} \quad (1.19)$$

误差信号从减法电路输出端加到放大器上，然后再加到天线的控制系统上。

由式 (1.19) 可见，这种单脉冲雷达的定向特性同天线的方向图、对数放大器的特性及其一致性都有关系。因此，对数放大器振幅特性的不稳定性和不一致性都会使定向特性发生畸变，从而使得在测定目标方向时出现误差。

当两个接收支路相同 ($\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa$) 并且角误差很小时，公式 (1.19) 可以写成如下的形式：

$$\begin{aligned} s(\theta) &= \ln \frac{F(\theta_0 - \theta)}{F(\theta_0 + \theta)} = \ln \frac{F(\theta_0)(1 + \mu\theta)}{F(\theta_0)(1 - \mu\theta)} = \ln \frac{1 + \mu\theta}{1 - \mu\theta} \\ &\approx 2 \left[\mu\theta + \frac{\mu^3\theta^3}{3} + \frac{\mu^5\theta^5}{5} + \dots \right] \approx 2\mu\theta \quad (1.20) \end{aligned}$$

式中 $F(\theta_0)$ ——天线在等强信号方向的增益系数；

μ ——天线方向图在工作部分的斜率。

装用振幅角度鉴别器的单脉冲雷达的主要缺点，是必须使两个放大器的振幅特性保持高度的一致性。

1-3-2 相位-相位式单脉冲雷达

在一个平面内定向的相位-相位式单脉冲雷达的简化方框图如图 1-8 所示。在这种雷达中，用来接收信号的是这样一种天线系统，它在每个座标平面内都形成互相平行的两个波束。

由两个方向图相同的天线所收到的回波信号可写为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1(t, \theta) &= E_m F(\theta) \exp i \left(\omega t + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \\ \dot{E}_2(t, \theta) &= E_m F(\theta) \exp i \left(\omega t + \gamma_\Phi - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

式中 $\Delta\varphi$ ——信号从目标到两个天线的行程差所引起的相移，其大小由公式 (1.1) 确定；

$\gamma_\Phi = \pi/2$ ——当等强信号方向与目标方向重合时 ($\theta = 0$)，为保证输出信号等于零所需的起始相移。

两个中频放大器的输出信号分别为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_1(t, \theta) &= \kappa_1 E_m F(\theta) \exp i \left(\omega_{np} t + \frac{\Delta \varphi}{2} \right) \\ \dot{u}_2(t, \theta) &= \kappa_2 E_m F(\theta) \exp i \left(\omega_{np} t + \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta \varphi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

在采用限幅方法来实现归一化时, 可将鉴相器输入端的信号表为下列形式:

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}'_1(t, \theta) &= U_{orp} \exp i \left(\omega_{np} t + \frac{\Delta \varphi}{2} \right) \\ \dot{u}'_2(t, \theta) &= U_{orp} \exp i \left(\omega_{np} t + \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta \varphi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.23)$$

式中 U_{orp} ——限幅门限。



图1-8 在一个平面内跟踪目标的相位-相位式单脉冲雷达的方框图

如果鉴相器内的振幅检波器按平方律检波, 即鉴相器对输入信号进行相乘及平均的运算, 则鉴相器输出端的信号可写为:

$$S(\theta) = \kappa_{\Phi\pi} \text{Re}[\dot{u}'_1(t, \theta) \dot{u}'_2(t, \theta)] \quad (1.24)$$

式中 $\kappa_{\Phi\pi}$ ——鉴相器的传输系数。

因此可得:

$$S(\theta) = \kappa_{\Phi\pi} U_{orp}^2 \sin \Delta \varphi \quad (1.25)$$

将公式 (1.1) 中的 $\Delta \varphi$ 值代入上式, 得:

$$S(\theta) = \kappa_{\Phi\pi} U_{orp}^2 \sin \left(\frac{2\pi l}{\lambda} \sin \theta \right) \quad (1.26)$$

误差信号从鉴相器加到误差信号放大器, 经放大后加到天线控制系统, 使天线旋转必要的角度。

装用相位角度鉴别器的单脉冲雷达的主要缺点, 是定向精度同接收支路的相位特性的一致性及其稳定性有很大的依赖关系。这些将在第六章中再作详细的讨论。

1-3-3 振幅和-差式单脉冲雷达

在装用和-差角度鉴别器的单脉冲雷达中, 对于接收支路特性的一致性要求不太严格, 所以比较普遍地用于现代的一些雷达站。在这种单脉冲雷达中, 目标回波信号从天线的输出端加到和-差变换器 (波导桥) 进行信号的相加和相减。由波导桥输出的高频信号及差信号又分别加到和及差接收支路, 在其中被变换为中频信号, 同时放大到所需的电平。

差信号的振幅就确定角误差的大小,而和信号与差信号之间的相位差则确定角误差的符号,即目标对于等强信号方向的偏移方向。

在一个平面内定向的振幅和-差式单脉冲雷达的方框图示于图 1-9。当目标偏离等强信号方向的偏移量很小时,天线第一和第二支路输出的信号由以下两式确定:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1(t, \theta) &= E_m F_1(\theta) \exp i\omega t = E_m F(\theta_0 - \theta) \exp i\omega t \\ &= E_m F(\theta_0) (1 + \mu\theta) \exp i\omega t \\ \dot{E}_2(t, \theta) &= E_m F_2(\theta) \exp i\omega t = E_m F(\theta_0 + \theta) \exp i\omega t \\ &= E_m F(\theta_0) (1 - \mu\theta) \exp i\omega t \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

由于功率的平衡分配,波导桥输出端的和信号及差信号分别为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_c(t, \theta) &= \frac{1}{\sqrt{2}} [\dot{E}_1(t, \theta) + \dot{E}_2(t, \theta)] = \sqrt{2} E_m F(\theta_0) \exp i\omega t \\ \dot{E}_p(t, \theta) &= \frac{1}{\sqrt{2}} [\dot{E}_1(t, \theta) - \dot{E}_2(t, \theta)] = \sqrt{2} E_m F(\theta_0) \mu\theta \exp i\omega t \end{aligned} \right\} \quad (1.28)$$

误差信号对回波信号振幅的依从关系是由自动增益控制系统来消除的。

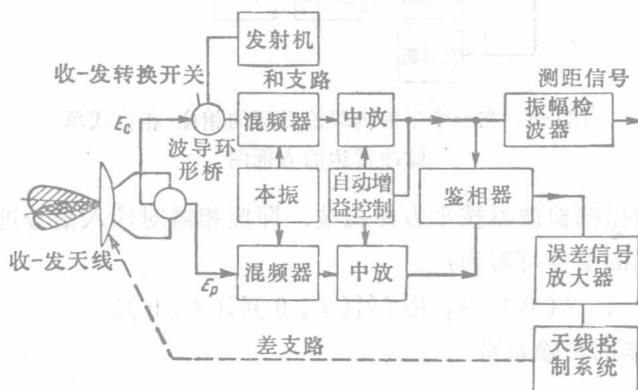


图1-9 在一个平面内跟踪目标的振幅和-差式单脉冲雷达的方框图

经过变频和放大后,同时考虑到自动增益控制系统的作用,就可将鉴相器输入端的和信号及差信号表示为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_c(t, \theta) &= \exp i(\omega_{np}t + \varphi_1) \\ \dot{u}_p(t, \theta) &= \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \mu\theta \exp i(\omega_{np}t + \varphi_2) \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

式中 φ_1 及 φ_2 ——支路中的相移。

在鉴相器的输出端得到:

$$S(\theta) = \kappa_{\Phi\pi} \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \mu\theta \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1.30)$$

振幅和-差式单脉冲雷达的和方向图及差方向图示于图 1-10。图上用《+》及《-》表示相位关系。由图可见,天线输出的差信号的相位系随目标偏离等强信号的方向而变化,它可能与和信号同相,也可能与和信号反相。在没有误差时(即目标方向与天线等强信号

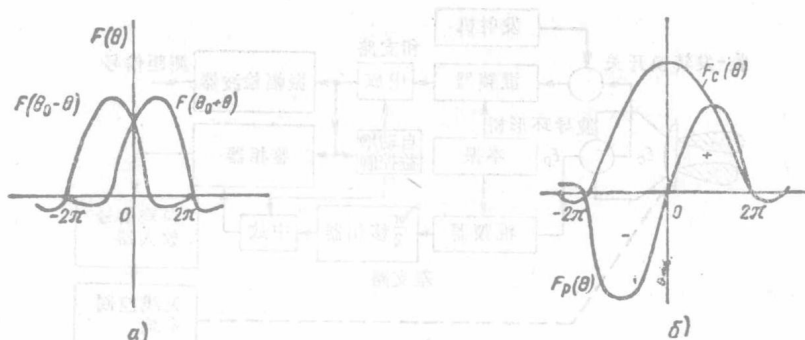


图1-10 在一个平面内定向的振幅和-差式单脉冲雷达的方向图
(α) 多波束方向图; (δ) 和方向图及差方向图。

方向重合时), 加到两个接收支路输入端的目标回波信号的振幅相等, 因此, 差信号等于零。

在定向过程或是在自动跟踪目标的过程中, 差信号都将被直接用来控制天线系统的位置。

接收时所形成的和信号, 不仅用作基准信号, 而且用来探测目标以及用于目标的距离与速度的测量。

1-3-4 相位和-差式单脉冲雷达

我们来研究相位和-差式单脉冲雷达 (图 1-11) 中的信号处理过程。按照 1-3-2 节中分析相位-相位式单脉冲雷达相似的方法, 此时可将天线输出端的信号写为:

$$\begin{cases} \dot{E}_1(t, \theta) = E_m F(\theta) \exp i \left(\omega t + \frac{\Delta \varphi}{2} \right) \\ \dot{E}_2(t, \theta) = E_m F(\theta) \exp i \left(\omega t - \frac{\Delta \varphi}{2} \right) \end{cases} \quad (1.31)$$

在波导桥输出端的和信号及差信号分别为:

$$\begin{cases} \dot{E}_c(t, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m F(\theta) \left[\exp i \left(\omega t + \frac{\Delta \varphi}{2} \right) + \exp i \left(\omega t - \frac{\Delta \varphi}{2} \right) \right] \\ \dot{E}_p(t, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m F(\theta) \left[\exp i \left(\omega t + \frac{\Delta \varphi}{2} \right) - \exp i \left(\omega t - \frac{\Delta \varphi}{2} \right) \right] \end{cases} \quad (1.32)$$

经过变频和放大后, 在考虑到自动增益控制的作用, 并考虑到在差支路中还有 $\pi/2$ 的附加相移时, 可将鉴相器输出端的误差信号写为:

$$S(\theta) = \frac{\operatorname{Re} \dot{u}_c(t, \theta) \dot{u}_p^*(t, \theta)}{\dot{u}_c(t, \theta) \dot{u}_c^*(t, \theta)} \quad (1.33)$$

式中 $\dot{u}_c^*$ 和 $\dot{u}_p^*$ —— 和支路及差支路输出信号的共轭复数值。

根据公式 (1.32), 可将式 (1.33) 写成:

$$S(\theta) = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \kappa_{\Phi \pi} \frac{\sin \Delta \varphi}{1 + \cos \Delta \varphi} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \kappa_{\Phi \pi} \operatorname{tg} \frac{\Delta \varphi}{2} \quad (1.34)$$

将公式 (1.1) 中的 $\Delta \varphi$ 值代入后, 得:

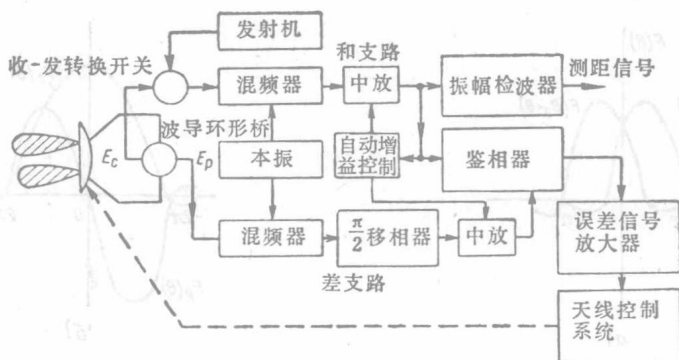


图1-11 在一个平面内跟踪目标的相位和-差式单脉冲雷达的方框图

$$S(\theta) = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \kappa_{\Phi n} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi l}{\lambda} \sin \theta \right) \quad (1.35)$$

误差信号从鉴相器输出后加到天线控制系统。

1-4 单脉冲搜索雷达系统

在 1-1 节中已提到, 无论雷达波束扫在空间的什么位置上, 一切目标, 只要它是处在天线方向图范围内, 而且在距离上又是可以分辨的, 则其座标即可测出。我们把这种雷达叫做单脉冲搜索雷达。下面以振幅定向法单脉冲搜索雷达为例来讨论。

1-4-1 振幅-振幅式单脉冲搜索雷达

如前所述, 带对数放大器的振幅角度鉴别器有很严重的缺点, 这就是两个放大器的振幅特性必须保持高度的一致性和稳定性。因此, 对数放大器在振幅-振幅式单脉冲雷达系统中就难于获得实际的应用。

现在来研究一种不必采用对数放大器的雷达线路。在图 1-12 所示的雷达中, 没有采用对数放大器。此时, 对信号的归一化是按照视频和信号来进行的。

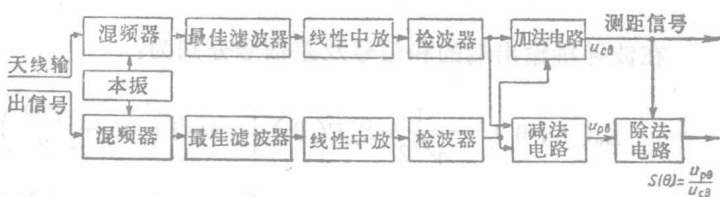


图1-12 在一个平面内测定目标座标的振幅-振幅式单脉冲搜索雷达的方框图

下面介绍用视频和信号

进行归一化的振幅-振幅式单脉冲搜索雷达的定向特性的构成。

当目标偏离等强信号方向为 θ 角时, 天线的输出信号即由公式 (1.27) 确定。此时, 检波器输出信号的表示式可以写为:

$$\left. \begin{aligned} u_1(\theta) &= \kappa_1 E_m F(\theta_0) (1 + \mu\theta) \\ u_2(\theta) &= \kappa_2 E_m F(\theta_0) (1 - \mu\theta) \end{aligned} \right\} \quad (1.36)$$

当两个接收支路相同时 ($\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa$), 加法电路输出端的信号为:

$$u_{\text{cs}} = u_1(\theta) + u_2(\theta) = 2\kappa E_m F(\theta_0) \quad (1.37)$$

而减法电路输出端的信号则为: