

中国大百科全书

电子学与计算机

II

中国大百科全书

电子学与计算机Ⅱ

中国大百科全书出版社

北 京
1998.10



中国大百科全书

中国大百科全书出版社

本卷主要编辑、出版人员

总 编 辑 姜椿芳

副 总 编 辑 金常政

责 任 编 辑 杨公谨 段 中

特 约 编 辑 王直华 刘兴民 李盛沐 李志武

陈 忠 吴新瞻 吴金英 芦良春

张德全 张道远 张潜萍 施德骥

龚继晏 陆小凡

编 辑 徐西林 沈育廉

图 片 编 辑 谢景臣

资料核对统一编辑 张敏善

索 引 编 辑 程力华 蒋仲英 干黎庭

装 帧 版 面 设 计 张慈中

责 任 校 对 姚秀丽 徐兆男

L

L xitong

L 系统 (L system) 一类动态细胞自动机,在每一(时间)步上,其中的各个细胞可以由给定状态变为一个新的状态,或消亡或分裂为具有某种状态组合的细胞串。A. 林顿梅伊尔曾用这种细胞自动机描述丝状有机体的发育过程,所以叫作林顿梅伊尔系统,简称 L 系统。

在乔姆斯基形式语言理论中,字母表被分成终结字母表和非终结字母表部分,“字”是由终结字母组成的字母序列。在 L 系统中,没有单独的终结字母表,所有生成的字都在系统语言中;初始字母可以被初始字所代替;被注视的字所包含的各个字母同时进行改写。每个字母代表一个细胞,用字表示细胞阵列发展的阶段。生成式对应于发展指令,这些指令的应用使有机体生长成已知类型。消亡的细胞可以用空字 e 表示。细胞之间可以有,也可以没有交互作用(信息传递)。有交互作用的有 1L 系统和 2L 系统。没有交互作用的叫作 0L 系统。

0L 系统是一个三元组 $\Gamma = (G, g, \delta)$, 其中 G 为一个有限非空集合,叫作字母表; g 为 G 中元素的非空序列,即非空字; δ 为一个(转移)函数,首先取作从 G 到 G^* (G 中元素所能构成的一切序列的集合)的有限非空子集的映射。然后,把 δ 扩充为从 G^* 到 G^* 的有限非空子集的映射。

如果空字 e 不能替换任何字母,即对 G 中所有字母 a , 都有 $e \notin \delta(a)$, 就称 Γ 为增殖 0L 系统,简称 P0L 系统;如果对字母表内每一个字母有且只有一个转移规则,即对 G 中所有 a , 在 G^* 中只有一个字 p 使 $\delta(a) = \{p\}$, 就称 Γ 为确定的 0L 系统,简称 D0L 系统。显然 $(P0L \cup D0L) \subseteq 0L$ 。而既增殖又确定的 DL 系统称为 DP0L。

L 系统举例 设 $C = (G, g, \delta)$, 且

$$\delta \downarrow \begin{array}{c|cccccccccccc|} G: & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & () & | \\ \hline & 1/0 & 3/2 & 3(4) & 3 & 5/6 & 3 & 7 & 5 & 8 & 3(9) & 5 & |0 & 3(2) & () & | \end{array}$$

其中 $(\cdot)$ 表示分枝, $|$ 表示细胞间直壁, $/$ 为斜壁(不分左倾或右倾),取初始字 $g=4$, G 和 δ 由表给出。终极字母集合 $T = \{3, (\cdot), |, / \}$ 。转移规则 $(1 \rightarrow 3|2)$ 表示每个处于状态 1 的细胞到下一时刻分裂成为分别处于状态 3 和 2 由一个直壁隔开的两个新细胞; $(2 \rightarrow 3(4))$ 意思是处于状态 2 的细胞,下一时刻分裂成为一个处于状态 3 的细胞和一个以它为基部分枝后处于状态 4 的细胞。这是一个 DP0L 系统。由这个系统 C 能生成字的无穷序列,即 $L(C)$ 。开头的六个字和它们的图解如下

$$S_0 = 4$$

4

$$S_1 = 5/6$$

5/6

$$S_2 = 3|7/5|8$$

3|7/5|8

$$S_3 = 3|3(9)/3|7|5|0$$

3|3|3|7|5|0

$$S_4 = 3|3(3(2))/3|3(9)|3|7|1/0$$

3|3|3|3|3|7|1|0

$$S_5 = 3|3(3(3(4)))/3|3(3(2))/3|3(9)|3|2/1/0$$

3|3|3|3|3|3|2|1|0

$$S_7 = 3|3(3(5/6))/3|3(3(3(4)))/3|3(3(2))/3|3(9)/3|2/1/0$$

3|3|3|3|3|3|3|2|1|0

(陈力行)

LC zhengdangqi

LC 振荡器 (LC oscillator) 由 LC 谐振回路作反馈电路的反馈型正弦波振荡器。其放大电路主要由晶体管或电子管构成,自振频率基本上决定于谐振回路的电感 L 和电容 C , 振荡幅度主要受制于有源电子器件的非线性和电源电压的幅度。

LC 振荡器因谐振回路具有很高的选择性,即使放大器工作在非线性区,振荡电压仍非常接近正弦形。但因它的谐振元件 LC 之值限于体积不宜过大,振荡频率不宜太低,一般为几百千赫到几百兆赫。频率稳定度 $\Delta f/f$ 一般为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 量级,略优于 RC 振荡器,但比石英晶体振荡器要低几个数量级。谐振元件 L 或 C 的数值调节方便,可借以改变振荡频率,因而为广播、通信、电子仪器等电子设备所广泛采用。

LC 振荡器依 L 、 C 在电路中的接法不同而有调集振荡器、哈特莱振荡器、科皮兹振荡器等主要类型。

调集振荡器 LC 谐振回路接在晶体管的集电极-发射极之间,并通过互感使基极和发射极间产生反馈耦合(图 1)。电感线圈的初、次级电压应互为反相,以实现正反馈。振荡频率 f 低于晶体管的 β 截止频率 f_β 时,调集振荡器的自振频率 f_0 和起振条件(见振荡)分别为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C + (L_1 L_2 - M^2)/R_1 R_0}}$$

$$g_m > \frac{L_1}{M} \times \frac{1}{R_0} + \frac{M}{L_2} \times \frac{1}{R_1}$$

式中 R_1 和 R_0 分别是放大器的输入和输出阻抗, g_m 是晶体管的跨导。调集振荡器一般适于产生几千赫到几兆赫的正弦振荡。它由于采用互感耦合方式而容易实现阻抗匹配。

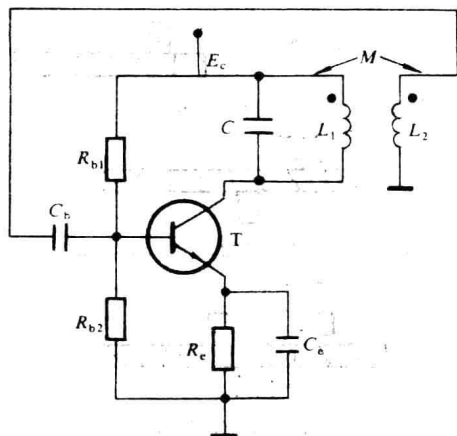


图1 调集型振荡电路

哈特莱振荡器 又称电感三点式振荡器。构成正反馈的 L_1 、 L_2 分别接在晶体管集电极-发射极和基极-发射极之间， C 接在集电极-基极之间(图2)。用于低频的自振频率 f_0 和起振条件分别为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC + (L_1 L_2 - M^2)/R_1 R_0}}$$

$$g_m > \frac{L_1 + M}{L_2 + M} \times \frac{1}{R_0} + \frac{L_2 + M}{L_1 + M} \times \frac{1}{R_1}$$

式中 $L = L_1 + L_2 + 2M$ 。哈特莱振荡器的线路简单，容易起振，也易于改变频率，但波形一般不太好，其振荡频率可从数百千赫到数十兆赫。

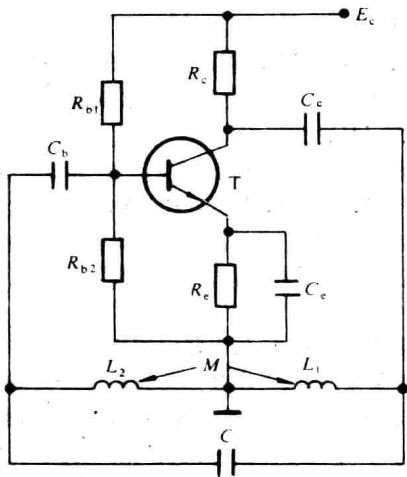


图2 哈特莱振荡电路

科皮兹振荡器 又称电容三点式振荡器。构成正反馈的 C_1 、 C_2 分别接在晶体管集电极-发射极和基极-发射极之间， L 接在集电极-基极之间(图3)。用于低频时，自振频率 f_0 和起振条件分别为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2} + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_0}}$$

$$g_m > \frac{C_2}{C_1} \times \frac{1}{R_0} + \frac{C_1}{C_2} \times \frac{1}{R_1}$$

科皮兹振荡器输出波形好，工作频率可达数百兆赫，

但极间电容变化对频率稳定度的影响较大，频率调整比较困难。

若在 L 支路中串入一个比 C_1 和 C_2 小得多的电容器 C_3 ，其自振频率将近似为

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}$$

它主要决定于 L 和 C_3 ，从而减轻了极间电容对频率稳定度的影响，也便于频率调整。经过这样改进的电路称为克拉泼振荡器。若在克拉泼振荡器的谐振元件 L 两端再

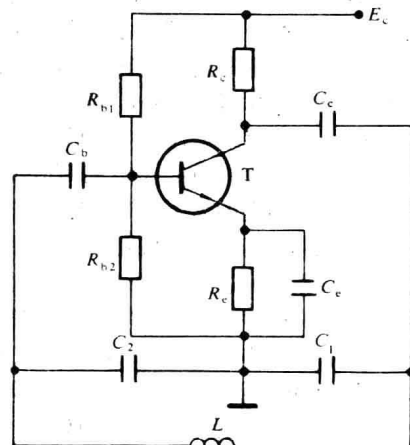


图3 科皮兹振荡电路

并接一个小电容器 C_4 ，就可构成西勒振荡器。这时，其自振频率 f_0 近似为

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+C_4)}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_3+C_4)}}$$

式中

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

西勒振荡器的振幅在工作频段内比较平坦，适于作为可变频率振荡器。

(宋亚民)

λ zhuanhuan yansuan

λ 转换演算 (calculus of λ-conversion)

用以定义可计算函数的形式演算系统。其特点是把函数与函数值明显区分，并把函数的演算归结为按一定规则进行一系列的转换，最后得到函数值。它在递归函数论和程序设计语言方面有重要应用。

研究概况 M. 熊芬克尔、H. B. 柯里和 A. 丘奇等分别于 20 年代开始研究组合逻辑和 λ 演算。丘奇从几个基本函数出发，构造 λ 可定义函数类。λ 可定义函数与递归函数的等价性是丘奇为其论题直观的可计算函数类等同于递归函数类辩护时使用的论证之一。历史上第一个不可判定问题就是丘奇构造的“任意给定的 λ 演算的表达式是否有归约式”。图灵机可计算函数与一般递归函数的等价性是通过 λ 演算证明的。在递归函数论的早期研究中，λ 演算起了重要作用。

丘奇最初把 λ 演算设计为他的一般函数系统的一部分。并试图使此函数系统成为数学的基础。S. C. 克林

和 J. B. 罗塞证明了这个系统是不一致的。丘奇于 1941 年提出现有部分作为一致的子理论。1969 年 D. 斯科特构造了该理论的模型, 进一步完善了 λ 演算系统。

基本内容 数学中的函数记法 $f(x)$ 既可表示函数值, 也可表示函数本身。为了避免这种含混, 丘奇限定 $f(x)$ 只表示函数值, 而用 $\lambda_x f(x)$ 表示函数。从研究变元取值和函数施用于变元的概念入手, 用 λ 表达式定义函数, 用一些严格定义的关于 λ 表达式的转换规则刻划函数的计算过程。

λ 表达式 用于从几个基本函数出发定义可计算函数类。 λ 表达式是从初始符号(λ , 左、右括号, 变量字母)开始归纳地定义的: 任何变量是 λ 表达式; 如果 M, N 是 λ 表达式, 则 MN 是 λ 表达式; 如果 M 是 λ 表达式, x 是自由出现于 M 中的变量, 则 $\lambda_x M$ 是 λ 表达式(如果变量 x 出现在 M 中某个形如 $\lambda_x M'$ 的子表达式中, 则称 x 在 M 中是约束出现的; 否则称 x 在 M 中是自由出现的)。表达式 $\lambda_x M$ 表示一个变元的函数, λ_x 称为约束变量部分, M 称为体部分。以后继函数 $f(x) = x + 1$ 为例, 其 λ 表达式为 $\lambda_x (x + 1)$, $f(x)$ 施用于整数自变量 3 可用如下 λ 表达式表示

$$f(3) = \lambda_x (x + 1)(3)$$

式中子表达式 $\lambda_x (x + 1)$ 称为该 λ 表达式的算子部分; 子表达式 3 称为其操作数部分。于是表达式 (MN) 表示把算子部分 M 施用于操作数部分 N , 这对应于函数的变量取值为 N 的情形。函数符号本身也可作为变量赋值。

正整数作为常函数可由 λ 表达式定义, 加、减、乘和乘幂等初等函数也可由 λ 表达式定义。可由 λ 表达式定义的函数称为 λ 可定义的。丘奇证明, 每个部分递归函数是 λ 可定义的, 而且每个 λ 可定义的函数是部分递归的, 即 λ 可定义函数与部分递归函数是等价的。

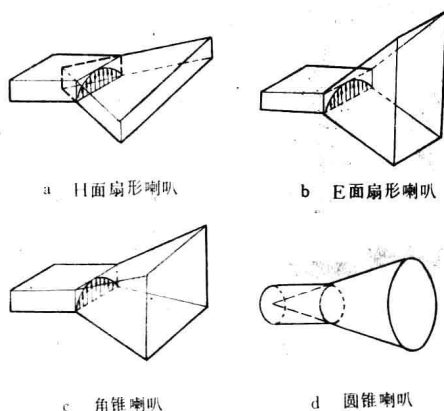
转换规则 λ 演算的计算过程, 是按照一些严格定义的转换规则进行 λ 表达式的转换。这些规则保证把一个 λ 表达式转换成另一个等价的 λ 表达式。如果用 $M[x/N]$ 表示以 N 代换 M 中 x 的自由出现所得到的结果, 则 λ 演算有如下规则: 如果 y 不在 M 中自由出现, 则 $\lambda_x M$ 可用等价的 $\lambda_y M[x/y]$ 代换; 如果 M 的约束变量中既不含 x , 也不含自由出现于 N 中的变量, 则可用 $M[x/N]$ 代换 λ 表达式中任何 $(\lambda_x M)N$, 也可用 $(\lambda_x M)N$ 代换 λ 表达式中任何的 $M[x/N]$ 。按这些规则进行的转换称为 β 转换。通过修改或添加某些规则, 可得到其他类型的转换。

一个 λ 表达式如果不再含有 $\lambda_x MA$ 形式的子表达式, 则称为归约式, 它对应于函数值。例如 λ 表达式 $\lambda_x (x + 1)(3) + \lambda_x (x + 1)(4)$ 经上述规则转换成 $(3 + 1) + (4 + 1)$, 这个归约式对应于函数值 9。任意给定的一个表达式是否有归约式这个问题, 是不可判定的。如果一个 λ 表达式含有一个以上的形如 $\lambda_x MA$ 的子表达式, 则计算的下一步是不确定的。但这种不确定性并不影响计算的最终结果。一般地, 如果一个 λ 表达式的不同转换序列均导致归约式, 则这些归约式是等价的。

λ 演算与程序设计语言 ALGOL、LISP 等程序设计语言的结构与丘奇的 λ 演算之间存在着一种本质的对应关系。例如, λ 演算中的函数 $\lambda(x_1 x_2 \cdots x_n)M$ 与 ALGOL 过程之间存在明显的对应关系: 前者的约束变量部分 $\lambda(x_1 x_2 \cdots x_n)$ 对应于后者的过程参数表; 前者的体部分 M 对应于后者的过程体。 λ 演算也能反映嵌套子程序和求值次序等结构, 可以用作研究某些程序语言的比较自然的模型, 函数式语言 LISP 就是建立在 λ 演算的基础上的。(何成武)

laba tianxian

喇叭天线 (horn antenna) 波导管终端渐变张开的圆形或矩形截面的微波天线。它是一种面天线(见图), 也称为喇叭。它的辐射特性由口面的尺寸与场分布决定, 而阻抗由喇叭的颈部(始端不连续处)和口面的反射决定。



喇叭天线

圆锥喇叭和角锥喇叭传播的是球面波, 而在一个面(E或H面)张开的扇形喇叭中传播的则是柱面波。喇叭口面场是具有二次方相位差的场, 二次方相位差的大小与喇叭的长度和口面大小有关。

由于喇叭天线结构简单和方向图易于控制, 通常用作中等方向性天线, 如标准喇叭, 最常见的是用作反射面的馈源(见天线馈源)。当它用作独立天线时, 一般都加上校正相位的反射面或透镜。喇叭-抛物反射面天线具有频带宽、副瓣低和效率高等特性, 常用于微波中继通信。而透镜因其重量较重和结构复杂等原因, 已很少用作喇叭的相位校正。

当喇叭长度一定时, 若使喇叭张角逐渐增大, 则口面尺寸与二次方相位差也同时加大, 但增益并不和口面尺寸同步增加, 而有一个其增益为最大值的口面尺寸, 具有这样尺寸的喇叭就叫作最佳喇叭。

喇叭天线的辐射场可利用惠更斯原理由口面场来计算。口面场则由喇叭的口面尺寸与传播波型所决定。可用几何绕射理论计算喇叭壁对辐射的影响, 从而使计算方向图与实测值在直到远旁瓣处都能较好地吻合。

为了扩展喇叭的频带, 必须减小喇叭颈处与口面处

的反射。口面尺寸加大,则反射减小。此外,把波导与喇叭的过渡段尽量做得平滑些,也可以减小该处的反射。由于该位置附近的喇叭尺寸还很小,因此,不能传播高次模,一般都传输单模。为了控制辐射方向图,有时口面上需要多模场分布,这时应在喇叭内适当位置引入能产生高次模的器件。这种喇叭叫作多模喇叭,可用作单脉冲雷达或高效率天线馈源。由于各模在喇叭内的相速不同,多模喇叭的频带比常规喇叭的要窄。

(茅于宽 任凯湘)

Laibunizi

莱布尼兹, G. W. (Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646~1716) 德国数学家。1646年6月21日生于德国莱比锡,1716年11月14日卒于汉诺威。1661年入莱比锡大学,1662年获学士学位,1667年在阿尔特道夫大学获法学博士学位。毕业后从事法律和外交工作多年。1672年莱布尼兹到巴黎从事数学研究,并开始对B.帕斯卡的计算器进行改进,不用连加或连减而直接进行乘法和除法运算。1673年,他在巴黎科学院表演了经他改进的计算机。他的计算机采用十字轮结构代替帕斯卡机的棘轮传动结构,完成了数字的不连续传输。后来,广泛使用的手摇计算机原理和莱布尼兹机的原理相同,他为机械计算机的发展作出重要贡献。



叶钟灵

叶钟灵

Lander

兰德尔, J. (John Randall, 1905~) 英国生物物理学家。1905年3月23日生于英格兰。1925年获曼彻斯特大学理学学士学位,1926年获理科硕士学位,1938年获理科博士学位。1926~1937年任通用电气公司研究实验室研究员。1937~1943年在伯明翰大学时任皇家学会研究员。1943~1944年任剑桥大学卡文迪许实验室讲师。1944~1946年任安德鲁大学物理学教授。1946年后任伦敦大学女王学院物理学教授,1961年后任生物物理学教授。1939年,兰德尔与H.布特研制成功实用的多腔磁控管。1945年获杜德尔奖章,1946年获休斯奖章,并成为皇家学会会员,1959年获斯科特奖。



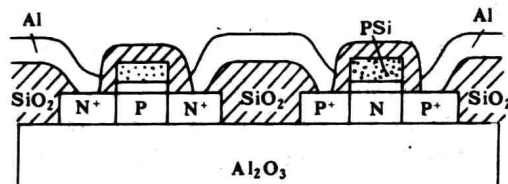
王直华

王直华

lanbaoshi shang waiyan gui gongyi

蓝宝石上外延硅工艺 (silicon on sapphire technique) 在蓝宝石片上外延生长一层硅薄膜以

制作半导体集成电路的技术,简称SOS。这种结构能提供理想的隔离,并减小PN结底部的寄生电容,故适合于制作高速大规模集成电路,实现高速和低功耗。一般多采用这种工艺制作CMOS电路(见互补金属-氧化物-半导体集成电路),即CMOS/SOS电路。SOS工艺所采用的蓝宝石晶向为(1102),硅外延薄膜的晶向为(100),膜厚约为0.5微米。制作CMOS/SOS集成电路有深耗尽型和双增强型两种工艺方法。



CMOS/SOS 结构

深耗尽型 CMOS/SOS 工艺 适当控制硅外延膜的掺杂浓度,使其中的一个NMOS管为深耗尽型,另一个PMOS管为增强型(见图)。

双增强型 CMOS/SOS 工艺 两种沟道的MOS管均为增强型,故要求两种类型的硅外延膜(图2)用离子注入掺杂工艺形成。深耗尽型CMOS/SOS工艺中的深耗尽型MOS管,对硅膜厚度和掺杂浓度要求较严,工艺较难控制。所以,采用全离子注入的双增强型CMOS/SOS工艺较多。

工艺特点 CMOS/SOS结构除具有一般CMOS的优点外,还具有如下的优点:①能消除源、漏区PN结底面电容,金属互连线寄生电容也大为减小,因而电路速度较高,平均功耗也减小。②器件之间的隔离比较理想,无需隔离阱和沟道截止环,有利于提高集成密度。③场区氧化物下面无体硅,避免辐射引起的场区反型漏电。因此,CMOS/SOS集成电路可制成耐辐射集成电路,适用于航天和核辐射环境。④能消除寄生PNPN闩流,从而消除通常CMOS中的闩锁效应。

SOS是一种异质外延结构,硅膜的缺陷密度较大,因而少数载流子寿命较短(1~10纳秒),不适于制作双极器件和电荷耦合器件。对来源于硅岛边缘和背界面(硅膜-蓝宝石界面)的漏电,须采取专门的方法加以抑制。来源于浮衬底的漏极电流的扭曲现象,使CMOS/SOS结构不利于在模拟技术中应用。蓝宝石单晶的熔点高和硬度大,单晶制备和加工较为困难。用蓝宝石作衬底成本较高,也是限制CMOS/SOS集成电路广泛应用的重要原因。SOI结构是为了在SOS技术中用一种绝缘体代替蓝宝石衬底而提出的一种新技术。人们正在研究用激光扫描方法,使二氧化硅上的多晶硅重结晶并向硅中注氧或氮以形成埋层绝缘体等方法。用“几何外延”的方法,也有希望获得SOI结构。

(和致经 刘忠立)

Langmuir

朗缪尔, I. (Irving Langmuir, 1881~1957)

美国化学家。1881年1月31日生于纽约州布鲁克林,1957年8月16日卒于马萨诸塞州法尔默斯。1903年毕业于哥伦比亚大学的矿业学院,获冶金工程师称号。1906年



在德国格丁根大学获化学博士学位。1906~1909年在斯蒂芬斯理工学院任教。1909年起在纽约的通用电气研究实验室研究物理化学,任助理主任,1932年任副主任。朗缪尔于1912年研制成功高真空电子管,使电子管进入实用阶段。1913年研制成充氮、充氩白炽灯。1924~1927年发明氢原子焊枪。他还

研制出高真空水银泵和探测潜艇用的声学器件。他在电子发射、空间电荷现象、气体放电、原子结构及表面化学等科学研究方面也作出很大贡献。他因在原子结构和表面化学方面取得成果,获得1932年度诺贝尔奖金化学奖。1915年、1920年两度获美国化学学会的尼科尔斯奖章,1918年获皇家学会的休斯奖章和朗福德奖章,1944年获法拉第奖章。

(王直华)

leida

雷达 (radar) 利用电磁波探测目标的电子设备。它发射电磁波对目标进行照射并接收其回波,由此获得目标至雷达的距离、距离变化率(径向速度)、方位、高度等信息。雷达是英文 RADAR (Radio Detection And Ranging) 的译音,意为“无线电检测和测距”。雷达的优点是白天黑夜均能检测到远距离的较小目标,不为雾、云和雨所阻挡。雷达是现代战争必不可少的电子装备。它不仅应用于军事,而且也应用于国民经济(如交通运输、气象预报和资源探测等)和科学研究(如航天、大气物理、电离层结构和天体研究等)以及其他一些领域。

发展简史 雷达的基本概念形成于20世纪初。但是直到第二次世界大战前后,雷达才得到迅速发展。早在20世纪初,欧洲和美国的一些科学家已知道电磁波被物体反射的现象。1922年,意大利 G. 马可尼发表了无线电波可能检测物体的论文。美国海军实验室发现用双基地连续波雷达能发觉在其间通过的船只。1925年,美国开始研制能测距的脉冲调制雷达,并首先用它来测量电离层的高度。30年代初,欧美一些国家开始研制探测飞机的脉冲调制雷达。1936年,美国研制出作用距离达40公里、分辨力为457米的探测飞机的脉冲雷达。1938年,英国已在邻近法国的本土海岸线上布设了一条观测敌方飞机的早期报警雷达链。

第二次世界大战期间,由于作战需要,雷达技术发展极为迅速。就使用的频段而言,战前的器件和技术只能达到几十兆赫。大战初期,德国首先研制成大功率三、四极电子管,把频率提高到500兆赫以上。这不仅提高了雷达搜索和引导飞机的精度,而且也提高了高射炮控制

雷达的性能,使高炮有更高的命中率。1939年,英国发明工作在3000兆赫的功率磁控管,地面和飞机上装备了采用这种磁控管的微波雷达,使盟军在空中作战和空-海作战方面获得优势。大战后期,美国进一步把磁控管的频率提高到10吉赫,实现了机载雷达小型化并提高了测量精度。在高炮火控方面,美国研制的精密自动跟踪雷达 SCR-584,使高炮命中率从战争初期的数千发炮弹击落一架飞机,提高到数十发击中一架飞机。

40年代后期出现了动目标显示技术,这有利于在地杂波和云雨等杂波背景中发现目标。高性能的动目标显示雷达必须发射相干信号,于是研制了功率行波管、速调管、前向波管等器件。50年代出现了高速喷气式飞机,60年代又出现了低空突防飞机和中、远程导弹以及军用卫星,促进了雷达性能的迅速提高。60~70年代,电子计算机、微处理器、微波集成电路和大规模数字集成电路等应用到雷达上,使雷达性能大大提高,同时减小了体积和重量,提高了可靠性。在雷达新体制、新技术方面,50年代已较广泛地采用了动目标显示、单脉冲测角和跟踪以及脉冲压缩技术等;60年代出现了相控阵雷达;70年代固态相控阵雷达和脉冲多普勒雷达问世。

在中国,雷达技术从50年代初才开始发展起来。中国研制的雷达已装备军队。中国已经研制成防空用的二坐标和三坐标警戒引导雷达、地-空导弹制导雷达、远程导弹初始段靶场测量雷达和再入段靶场测量与回收雷达。中国研制的大型雷达还用于观测中国和其他国家发射的人造卫星。在民用方面,远洋轮船的导航和防撞雷达、飞机场的航行管制雷达以及气象雷达等均已生产和应用。中国研制成的机载合成孔径雷达已能获得大面积清晰的测绘地图。中国研制的新一代雷达均已采用计算机或微处理器,并应用了中、大规模集成电路的数字式信息处理技术,频率已扩展至毫米波段。

工作原理 雷达天线把发射机提供的电磁波能量射向空间某一方向,处在此方向上的物体反射碰到的电磁波。这些反射波载有该物体的信息并被雷达天线接收,送至雷达接收设备进行处理,提取人们所需要的有用信息并滤除无用信息。

雷达可分为连续波雷达和脉冲雷达两大类。单一频率连续波雷达是一种最为简单的雷达形式,容易获得运动目标与雷达之间的距离变化率(即径向速度)。它的主要缺点是:①无法直接测知目标距离,如欲测知目标距离,则必须调频,但用调频连续波测得的目标距离远不及脉冲雷达精确;②在多目标的环境中容易混淆目标;③大多数连续波雷达的接收天线和发射天线必须分开,并要求有一定的隔离度。

脉冲雷达 容易实现精确测距,而且接收回波是在发射脉冲休止期内,不存在接收天线与发射天线隔离的问题,因此绝大多数脉冲雷达的接收天线和发射天线是同一副天线。由于这些优点,脉冲雷达(图1)在各种雷达中居于主要地位。这种雷达发射的脉冲信号可以是单

一载频的矩形脉冲,如普通脉冲雷达的情形;也可以是编码或调频形式的脉冲调制信号,这种信号可以增大信号带宽,并在接收机中经匹配滤波输出很窄的脉冲,从而提高雷达的测距精度和距离分辨力,这就是脉冲压缩雷达。

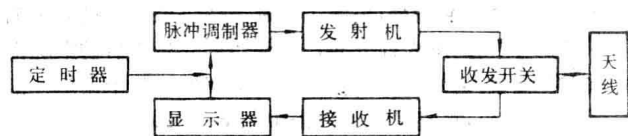


图1 脉冲雷达简化框图

此外,雷达发射的相邻脉冲之间的相位可以是不相干(随机)的,也可以是具有规律性的相干信号。相干信号的频谱纯度高,能得到好的动目标显示性能。

目标定位 对地面和海面目标定位,就是测量它相对于雷达的距离和方位。对空中目标的定位则需要同时测量距离、方位和高度,这种雷达称为三坐标雷达。测量距离实际是测量发射脉冲与回波脉冲之间的时间差,因为电磁波以光速传播,据此就能换算成目标的精确距离。目标方位是利用天线的尖锐方位波束来测量。在同样窄的波束条件下,用单脉冲方法可得到比单一波束更高的测量精度(见跟踪雷达)。仰角靠窄的仰角波束测量。根据目标的仰角和距离就能通过计算得到目标高度,精确的仰角同样可用单脉冲方法获得。

多普勒频率 当雷达和目标之间有相对运动时,雷达接收到的目标回波频率与雷达发射频率不同,两者的差值称为多普勒频率。若目标作接近雷达的运动,则接收到的回波频率高于发射频率,多普勒频率是正值,相反为负值。从多普勒频率中可提取的主要信息之一是雷达与目标之间的距离变化率(也称径向速度),它们之间的关系 $f_d = 2dR/\lambda dt$, 式中 f_d 为多普勒频率, λ 为发射波长, dR/dt 为距离变化率。

当目标与干扰杂波同时存在于雷达的同一空间分辨单元内时,雷达利用它们之间多普勒频率的不同能从比目标回波强得多的干扰杂波中检测和跟踪目标。方法可分为非相干动目标显示和相干动目标显示。非相干动目标显示是依靠目标和干扰物两者多普勒频率不同而产生的差拍频率,这个差拍频率可以直接从显示器上看出。这种方式的优点是经济简单,缺点是性能不佳,因为必须有干扰物存在时才能通过差拍频率检测到目标,而当干扰杂波比目标回波强得多时,则会使差拍频率幅度变化极小而难以检测。因此,性能优良的雷达均采用相干动目标显示的方法。雷达要在强大干扰杂波中检测目标回波,必须有好的相干性,这就要用晶体振荡倍频放大式发射机。在信号处理上,较简单的是用杂波滤波器,通常称为动目标显示技术;更复杂的是在杂波滤波器之后再串接一系列在频率上相邻接的窄带滤波器组,这样就能获得更好的效果。这种方式在低重复频率时通常称为动目标检测技术,地面动目标检测雷达有时还配有地杂波图以提高性能;在高脉冲重复频率时,通常称为脉冲多普勒技术。性

能先进的机载下视雷达均采用脉冲多普勒技术。

主要组成 脉冲调制雷达的主要组成包括发射机、脉冲调制器、收发开关、天线、接收机、显示器和定时器等部分。

发射机 它可以是一个磁控管振荡器。这是微波雷达发射机早期的方式,简单的雷达仍在沿用。现代的高性能雷达要求有相干信号和高的频率稳定度。因此就需要用晶体振荡器作为稳定频率源,并通过倍频功率放大链得到所需的相干性、稳定度和功率。放大链的末级功率放大管最常用的是功率行波管或速调管。频率低于600兆赫时,可以使用微波三极管或微波四极管。

脉冲调制器 它产生供发射机开关用的调制脉冲。它必须具有发射高频脉冲所需要的脉冲宽度,并提供开关发射管所需的调制能量。使用真空管或晶体管作为放电开关,称为刚管调制;使用氡气流管对人工线储能作放电开关,称为软管调制。此外,也可用电磁元件作脉冲开关调制。对调制脉冲的一般要求是起边和落边较陡,脉冲顶部平坦。

收发开关 它在发射脉冲时切断接收支路,尽量减少漏入接收支路的发射脉冲能量;当发射脉冲结束时断开发射支路,由天线接收的回波信号经收发开关全部进入接收支路。收发开关通常由特殊的充气管组成。发射时,充气管电离打火形成短路状态,发射脉冲通过后即恢复开路状态。为了不阻塞近距离目标回波,充气管从电离短路状态到电离消除开路状态的时间极短,通常为微秒量级,对于某些雷达体制为纳秒量级。

天线 雷达要有很高的目标定向精度,这就要求天线具有窄的波束。搜索目标时,天线波束对一定的空域进行扫描。扫描可以采用机械转动方法,也可以采用电子扫描方法。大多数天线只有一个波束,但有的天线同时有几个波束。分布在天线副瓣中的能量应尽量小,低副瓣天线是抗干扰所需要的。

接收机 一般采用超外差式。在接收机的前端有一个低噪声高频放大级。放大后的载频信号和本振信号混频成中频信号。模拟式信号处理(如脉冲压缩和动目标显示等)在中频放大级进行,然后检波并将目标信号输至显示器。采用数字信号处理时,为了降低处理运算的速率,应该把信号混频至零中频;为了保持相位信息,零中频信号分解成二个互相正交的信号,分别进入不同的两条支路,然后对这两条支路作数字式处理,再将处理结果合并。

显示器 把雷达获得的经过处理的有用信息显示给雷达观察员的设备(见雷达显示器)。通常是把这些信息显示在阴极射线管荧光屏上。较为简单的雷达是在模拟处理后将信息直接输送至显示器。最常见的显示器是搜索雷达用的平面位置显示器,它的优点是能把雷达四周的目标可全部直观地显示出来。雷达处在显示器中心原点上,细小的辉亮弧条表示飞机目标。目标所处的方位判读与地图的读法相同,即正上方表示正北(相对于雷达)。

辉亮目标和中心点之间的距离表示雷达至目标间的距离。对于先进的雷达,信息经数字处理后还输送给平面位置显示器,用以消除荧光屏上剩余的杂波和噪声。另外,还可将地图重叠到显示器上(图2)。如果是三坐标雷达,还可在目标旁用数码表示目标高度。新型表格显示器还能将目标的批号和其他有用的信息全部以数码形式表示出来(图3)。

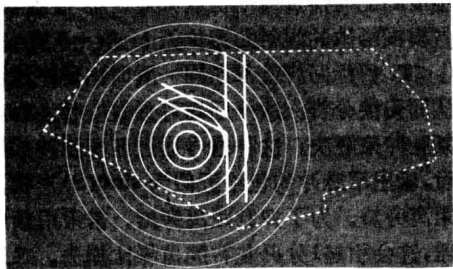


图2 数字处理后的目标与航路管制区图形叠合的平面位置显示

PCA1601	T1800	H0800	U0000
PCA1602	T1100	H1200	U1000
PCA1603	T1200	H1300	U1100
PCA1604	T1300	H1400	U1200
PCA1605	T1330	H1500	U1300
PCA1606	T1400	H2000	U1400
PCA1607	T1430	H2100	U1500
PCA1608	T1500	H2200	U1600
PCA1609	T1530	H2300	U1700
PCA1610	T1600	H2400	U1800

图3 多批目标表格显示

定时器 雷达是一种复杂的系统,由许多具有不同功能的分机组成。这些分机必须按照一定的节拍,或同时或先后进行工作。定时器就是以触发脉冲的形式,为这些分机提供所需的精确节拍的设备。

应用 现代雷达的应用极为广泛,它不仅作为武器装备应用于军事,成为目标搜索、跟踪、测量和武器引导、控制以及敌我识别等不可缺少的设备,而且在民用和科学研究方面也有十分重要的作用,如机场和海港的管理、空中交通管制、天气预报、导航及天文研究等都需要使用雷达。

军事应用 ①搜索和引导:对空搜索雷达的用途是尽早发现敌方飞机,对海搜索雷达用以发现敌方舰船。搜索雷达通常是二坐标的,即测定入侵武器的实时方位和距离。发现敌机后若要引导己方歼击机去迎击,还需要测定敌机高度,需要用三坐标雷达进行引导。三坐标引导雷达可兼作搜索之用。第三个坐标(仰角)可用多波束、频扫和相扫等方法获得。②跟踪测量和火控:在发射导弹

和卫星时,为了知道其是否进入正确的轨道,在起飞段需要有精密的跟踪测量雷达,测定目标的方位、距离、高度、速度等信息。这种雷达通常采用单脉冲测角方式,并把自动化跟踪的数据输入计算机,获得目标的未来轨迹。高射炮或地空导弹的火控雷达也用单脉冲测角,它不仅精度高,而且抗干扰能力强。③敌我识别:敌我识别器用于探明目标是敌机还是我机(友机),这是一种利用二次雷达原理工作的设备。敌我识别器包括询问机和应答器,实际上是一种特殊的发射、接收设备。询问机通过天线向目标发射编码询问信号,我(友)机上装的应答器在收到询问信号后发回特殊的编码回答信号。回答信号经询问机接收并解码后在显示器上显示出我机的标志。④战斗机下视、下射和测绘:机载雷达具有下视能力,以发现低空飞行的飞机、巡航导弹或地面高速行驶的车辆,这时会有很强的地杂波从天线进入接收机中。另外,由于雷达载机的高速飞行,地杂波谱会发生很大扩散。这些都会增加机载雷达从地杂波中检测动目标的难度。机载下视雷达的另一重要用途是地形测绘,其原理是利用雷达载机高速运动对地面各点所产生的不同的多普勒频率变化,使方位分辨力比天线真实方位波束的分辨力提高数百倍甚至上千倍(见合成孔径雷达)。雷达测绘地图可接近光学照相所能达到的清晰度,并且不受气象条件和黑夜的限制。但是,飞机对机载雷达的体积重量限制极严,因而必须采用优越的结构设计、精密的加工和先进的设备。微波集成、线性电路集成和大规模数字电路集成是减轻重量、缩小体积和提高可靠性的重要技术途径。

民用和科研应用 ①机场和海港管理:现代机场的飞机起落频繁,而且要求在黑夜或能见度差的云雾天气安全正点起落。因此,空中交通管制雷达就成为现代机场必备的设备,以实现全面的空中交通管制。现代机场配有较远距离的航线监视雷达、机场上空四周的空中监视雷达和观测跑道上飞机的高分辨力航空港监视雷达等。海港和河港的船舶进出也十分频繁,必须使用分辨力高的雷达和应答器提供监视、指挥、进港导航等服务,以避免碰撞、搁浅等灾难。②气象预报:气象雷达能对恶劣天气提前发出警报,例如,可观测400~500公里以外的台风中心并测知其行进速度和方向。海船上和飞机上装有气象雷达,可测知前进航道上的暴风雨区,从而采取绕道行驶的航线。③天文研究:天文雷达是研究较近天体的有力工具,它能精确测定天体离测定点的距离。现代雷达测月球距离的精度已达米的量级,这是其他方法无法达到的。它还能测知天体的形状和自转的方向与速度等。④导航:舰船上一般均装有导航雷达,这种雷达应有较高分辨力,避免在航行中与邻近的船只或小岛碰撞。有些飞机上装有多普勒导航雷达,多以连续波工作,天线产生前后左右几个波束,借以测定航线的偏差。

发展趋势 相控阵雷达特别是固态相控阵雷达具有极高的可靠性,它的天线有可能与装载雷达的飞机或卫星等载体的形状完全贴合(称为共形天线),是受到人们

重视的新型雷达。动目标检测和脉冲多普勒雷达具有在极强杂波中检测小的动目标的能力,已得到进一步发展。雷达波长将向更短的方向扩展,从3毫米直至激光波段。毫米波雷达和激光雷达的信号虽然在大气层内有严重衰减,但更适于装在卫星或宇宙飞船上工作,只用很小的天线就能得到极高的定位精度和分辨力。雷达设备模块化、小型化、高机动性和高可靠性是总的发展趋势。为了提高军用雷达的抗干扰性能和生存能力,除改进雷达本身设计外,把多种雷达组合成网,则可获得更多的自由度。天线和信息处理的自适应技术,导弹真假弹头和飞机机型、架数的识别技术,也是雷达技术的重要研究课题。

参考书目

- 蔡希尧:《雷达系统概论》,科学出版社,北京,1983。
M. I. 斯科尔尼克著,谢卓译:《雷达手册》,国防工业出版社,北京,1978。(M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1970.)
D. K. Barton, *Radar System Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1964。
M. I. Skolnik, *Introduction to Radar System*, McGraw-Hill, New York, 1980。
E. Brookner, *Radar Technology*, Artech House, Dedham, 1977。

(张直中)

leida boxing

雷达波形 (radar waveform) 雷达发射信号的波形。广义的雷达波形包括发射波形和接收波形。接收波形是指与雷达接收机滤波器相匹配的波形。在雷达对接收信号进行失配处理时,接收波形不同于发射波形。

雷达波形种类繁多,按其模糊函数形式大体可划分为三类:①具有刀型模糊函数的信号,包括具有正刀型模糊函数的恒载频脉冲信号和具有倾斜刀型模糊函数的线性调频脉冲信号;②具有图钉型模糊函数的伪随机编码信号;③具有钉床型模糊函数的相参脉冲列信号(见雷达模糊)。除恒载频脉冲信号外,其他各类信号的时宽-带宽积均大于1,统称为大时宽-带宽积信号。其中,具有倾斜刀型和图钉型模糊函数的信号为宽脉冲编码信号。由于引入脉内非线性相位调制,宽脉冲具有窄脉冲的带宽,通过匹配滤波或相关积分处理后,可压缩成窄脉冲输出,称之为脉冲压缩信号。这种信号既具有宽脉冲波形的优良检测性能和测速性能,又具有窄脉冲波形的高距离分辨力和测距性能。脉冲压缩波形按照脉内非线性相位调制规律可分为调频脉冲压缩信号和相位编码脉冲压缩信号两类。前者又有线性调频和非线性调频之分,后者则有二相编码、多相编码和互补编码之分。

线性调频矩形脉冲信号 这种信号的包络是宽度为 T 的矩形脉冲,其瞬时载频随时间线性变化。信号的数学表达式可写为

$$s(t) = A \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2)$$

式中 $k = \frac{B}{T}$ 为频率变化斜率, B 为频率变化范围,也是信

号的带宽;信号的时宽-带宽积 $TB = kT^2 = D$ (脉冲压缩比)。当 $D \gg 1$ 时 (通常 $D \approx 10^2 \sim 10^3$) 信号具有近似矩形的振幅频谱和平方律相位特性。信号的模糊函数呈倾斜刀型,与同样宽度的恒载频脉冲信号相比,模糊函数沿 ξ (多普勒频移) 轴向切割的主瓣宽度相同,而沿 τ (时延) 轴向切割的主瓣宽度缩小 D 分之一,亦即两者的速度分辨力与测速精度相同,而线性调频脉冲的距离分辨力和测距精度则比同样宽度的恒载频脉冲信号提高 D 倍。这种信号模糊函数的倾斜刀型位于 $\xi - k\tau = 0$ 直线上,即只要 $|\tau| < T$, 目标回波就都在同一瞬时出现在滤波器输出端,从而无法分辨。这个问题可通过交替发射斜率相反的调频脉冲来解决。这种信号通过匹配滤波或相关积分处理后,输出窄脉冲的包络近似为 $\operatorname{sinc}(x)$ 形状,具有较高的距离旁瓣。为了抑制距离旁瓣,常采用频域加权失配处理,这会引起1分贝左右的信噪比损失。采用适当的非线性调频(如正切调频)进行匹配处理,同样可获得低的距离旁瓣,却避免了失配引起的信噪比损失。

二相编码脉冲信号 由 p 个紧连着的子脉冲组成。每个子脉冲的载频不变,相位按二元伪随机序列 $[C_k; C_k \in (+1, -1), k=1, 2, \dots, p]$ 编码。式中 $C_k = +1$ 表示正常的载波相位; $C_k = -1$ 表示载波有 180° 相移。信号的数学表达式可写为

$$s(t) = A \sum_{k=1}^p C_k \operatorname{rect}\left[\frac{t}{\tau} - \left(k - \frac{p+1}{2}\right)\right] \cos 2\pi f_0 t$$

式中 p 为伪随机序列长度,也是这种信号的脉冲压缩比; τ 为子脉冲宽度; $p\tau$ 为整个编码脉冲的宽度。信号的模糊函数呈近似图钉型,一般选择具有良好非周期自相关函数的伪随机序列(如巴克序列),使模糊函数沿距离轴向切割具有均匀的低旁瓣,主瓣宽度与子脉冲信号自相关函数的主瓣宽度相同。与宽度为 $p\tau$ 的恒载频脉冲信号相比,速度分辨力和测速精度相同,距离分辨力和测距精度提高了 p 倍。当回波信号与匹配滤波器有多普勒失谐时,滤波器不起脉冲压缩作用,必须通过频率跟踪回路加以补偿,因此这种波形常用于多普勒变化范围较窄的场合。

相参脉冲列信号 由多个以一定间距重复出现的恒载频窄脉冲组成。信号保留了窄脉冲的带宽,时宽则随脉冲数而增大,若附加其他调制(如脉内相位编码、脉间频率编码、重复周期编码等),还可增大信号带宽。最常用的是均匀脉冲列信号,其数学表达式可写为

$$s(t) = A \sum_{k=1}^n v \left[t - \left(k - \frac{n+1}{2} \right) T_r \right] \cos 2\pi f_0 t$$

$$v(t) = \operatorname{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right)$$

式中 τ 为窄脉冲宽度; T_r 为重复周期; n 表示脉冲数。信号模糊函数呈钉床型,它把绝大部分模糊体积移出中心主瓣,分散到周期重复的模糊瓣内,使中心主瓣变得尖锐,因而同时具有较高的距离分辨力和速度分辨力。由于

存在周期重复的模糊瓣,当 T_r 取值不同时会产生距离和速度模糊,或二者之一(见脉冲多普勒雷达)。为了提高雷达抑制杂波的能力,按照最大信号干扰比准则设计的最优信号-滤波器“波形对”,是一对具有不同复加权系数的相参脉冲列信号。它与均匀脉冲列信号不同之处,是对子脉冲进行了振幅和相位加权,或二者之一。

为了提高雷达反侦察、抗干扰能力,70年代以来的雷达,大多配有多种波形,以适应不同的目标和干扰环境,并向波形自适应的方向发展。

参考书目

M. I. 斯科尔尼克著,谢卓译:《雷达手册》,国防工业出版社,北京,1978。(M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1970.)

(林茂庸)

leida celiang jingdu

雷达测量精度 (accuracy of radar measurement)

雷达测量正确性或误差大小的量度。测量误差,一般用测量值与真实值之差的平方的统计期望值(均方误差)或平方根(均方根误差)来表示。雷达所测量的目标参数通常包括目标距离(回波时延)、距离变化率(多普勒频移)、方位角和俯仰角(回波到达角)等。现代雷达还能测量目标尺寸、形状和其他参数。测量精度的根本限制因素是噪声。根据参量估计理论可以求出雷达测量的极限精度,并把它作为设计和评价雷达的重要依据之一。

雷达回波由信号 $s(t-T)$ 加噪声 $n(t)$ 组成,式中 T 是回波信号的时延。时延 T 的估计值的均方根误差的下限为

$$\delta T = \frac{1}{\beta(2E/N_0)^{1/2}}$$

$$\text{式中 } E = \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(f)|^2 df$$

$$\beta^2 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} (2\pi f)^2 |s(f)|^2 df$$

分别为信号能量和有效带宽; N_0 为噪声的功率谱密度(即单位带宽内的噪声功率); $s(f)$ 为 $s(t)$ 的傅里叶变换。多普勒频移的估计值的均方根误差的下限为

$$\delta f = \frac{1}{\alpha(2E/N_0)^{1/2}}$$

$$\text{式中 } \alpha^2 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} (2\pi t)^2 s^2(t) dt$$

为信号的有效时宽。

对于任意波形总有 $\beta\alpha \geq \pi$ 。因此

$$\delta T \delta f \leq \frac{1}{\pi(2E/N_0)}$$

这说明,只要有足够大的信噪比 E/N_0 并选择 $\beta\alpha$ 足够大的雷达信号,测量时延(距离)和频移(速度)均可获得所希望的精确程度。

由于天线方向图 $G(\theta)$ 和天线口径面上场的幅度分布 $A(x)$ 之间也近似有傅里叶变换的关系,可以同样求得角度估值的均方根误差的下限为

$$\delta\left(\frac{\theta}{\lambda}\right) = \frac{1}{\gamma(2E/N_0)^{1/2}}$$

$$\text{式中 } \gamma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (2\pi x)^2 |A(x)|^2 dx / \int_{-\infty}^{+\infty} |A(x)|^2 dx$$

γ 称为有效口径宽度; λ 为雷达波长。因此,雷达测量精度与雷达波形有密切关系。

(王励)

leida duikang

雷达对抗 (radar countermeasures)

采用专门的电子设备和器材对敌方雷达进行侦察和干扰的电子对抗技术。雷达对抗包括雷达侦察和雷达干扰。其目的是获取敌方雷达的战术和技术情报,采取相应的措施,阻碍雷达的正常工作,减低雷达的工作效能。

雷达侦察 使用雷达侦察设备截获敌方的雷达信号并经过分析、识别、测向和定位,获取战术技术情报,是雷达对抗的基础。雷达侦察分为雷达情报侦察和雷达对抗支援侦察,两者互为补充。雷达情报侦察的主要任务,是通过对方雷达的侦测获取雷达的特征参数,判断雷达的性能、类型、用途、配置和所控制的武器等有关战术技术情报以及防御系统的组成。它是制定作战计划、研究雷达对抗技术和使用雷达对抗设备的依据。雷达对抗支援侦察的主要任务,是在情报侦察、获取数据的基础上,实时截获敌方雷达的信号,分析识别威胁雷达的类型、数量、威胁性质和威胁等级等有关情报,为作战指挥实施雷达告警、战术机动、引导干扰和引导杀伤武器等战术行动提供依据。

基本原理 雷达辐射电磁信号,是实施雷达侦察的前提。通常,雷达的类型、工作体制和基本性能由其特征参数表示,如载波频率、发射功率、调制类型、脉冲宽度、脉冲重复频率、天线方向图、天线扫描类型、极化形式和频谱宽度等。在这些参数中,有些只能间接测量计算,如发射功率、调制类型等;有些可直接测量,如载波频率、脉冲参数、频谱等。根据这些参数,可以判断雷达类型及其配属的武器系统。例如,探测到低重复频率的雷达信号,表明为预警雷达;探测到高重复频率的雷达信号,表明为控制武器的跟踪雷达;同时探测到相同重复频率的多个载频信号,表明为频率分集雷达;通过对雷达测向和交叉定位,可以判断出雷达的地理位置等。利用这些信息即可判断武器防御系统的组成。对于雷达侦察设备来说,这些雷达的特征参数以及雷达信号的到达方向和波束指向侦察波束的时间,都不具备先验信息。因此,侦察设备截获信号,除了接收机具有高的信号检测概率外,还有侦察接收机频率与雷达工作频率、侦察天线波束与雷达天线波束重合问题。因此,侦察设备截获威胁雷达信号的概率是信号检测概率、频率重合概率和波束重合概率等各种概率的乘积。对于短暂信号,截获概率要高。必须采用先进的技术,组成复杂的综合系统。雷达用途广泛,体制繁多,频率覆盖范围宽,信号形式复杂。因此,侦察设备在密集复杂的电磁环境中,其输入端是多部雷达形成的随机

交错信号流。侦察设备必须从随机交错的信号流中分离出各个独立的雷达信号序列,测定其参数,与数据库中已存参数进行比较。对于新出现的雷达信号,则补充到数据库中去。雷达接收机接收目标回波,其信号能量与雷达和目标间距离的四次方成反比;而侦察接收机接收雷达发射的直射波,信号能量与它和雷达间距离的二次方成反比,因而侦察距离大于雷达的作用距离。这是雷达侦察的显著优点,在军事作战中可获得较长的预警时间;其次是隐蔽性好,有利于监视敌方的活动。在自由空间,雷达侦察设备的侦察距离,用侦察方程(1)估算

$$R = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r}{P_r} \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{r\zeta}{n}} \cdot 10^{-0.1\beta R_0} \quad (1)$$

式中 R 为侦察距离; P_t 为雷达发射机的输出功率; G_t 为雷达天线在侦察站方向的增益; G_r 为侦察天线的增益; P_r 为侦察接收机的输入功率; λ 为工作波长; r 为接收天线的极化系数; ζ 为接收设备高频传输系数; n 为分辨系数; β 为大气传输损耗系数(分贝/公里); R_0 为不考虑大气衰减时的侦察距离。式中工作波长较长时,可忽略大气衰减的影响,此时, $\beta=0$ 。若 P_r 为侦察接收机的门限电平 $P_{r\min}$ 和 G_{t0} 为雷达天线波束指向侦察天线时的 G_t , 则 R 为最大侦察距离 $R_{\max}$ 。此时, (1) 式可简化为

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{P_t G_{t0} G_r \lambda^2 r\zeta}{P_{r\min} (4\pi)^2 n}} \quad (2)$$

由于在雷达频段电波为直线传播,最大侦察距离受地球曲率和大气折射的影响。地球表面两点间的传播距离,按下式计算

$$R_{\text{直线}} = 4.12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (\text{km}) \quad (3)$$

式中 h_1 、 h_2 分别表示雷达天线和侦察天线的高度(米)。实际的侦察距离必须满足(2)、(3)两个方程。

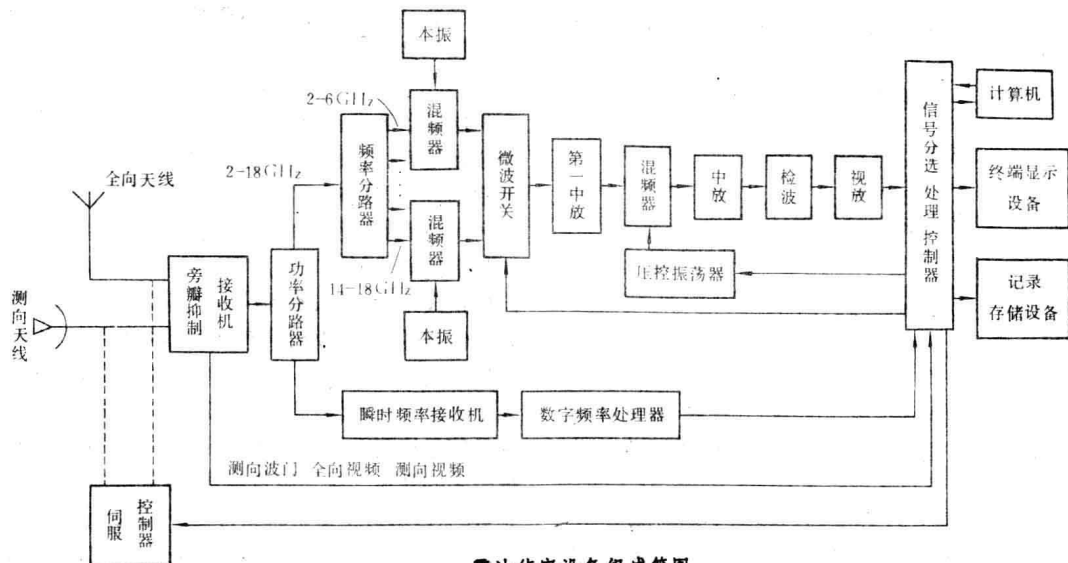
对雷达侦察设备总的要求是频率覆盖范围宽,截获概率高,测向、测频和测量参数的精度高,接收机灵敏度高,动态范围大,解调功能完善和自适应能力强等。

设备组成 雷达侦察设备一般由天线和伺服控制器、接收机、信号分选和处理器以及显示记录设备等组成(见图)。它的主要特点是全向天线和定向天线相结合,具有抑制旁瓣的功能;瞬时测频接收机引导超外差接收机提高了频率截获概率,并具有较好的信号分析功能。天线和伺服控制器从空间接收电磁信号和测量信号的到达方向,通常采用圆极化或斜极化形式。测向的方法有搜索测向法和非搜索测向法。前者使用锐波束天线,后者一般采用比幅和比相两种基本体制。接收机用于接收和放大信号,解调信号,测量信号的频率。测频的方法有搜索法和非搜索法。信号分选和处理器将接收到的交错信号去交错,分离成为各个独立的信号序列,经过测量参数和识别后送到显示和存储设备。常用的显示器有全景显示器、方位频率显示器、频谱显示器和字符表格显示器等。常用的存储设备有磁带(盘)记录器、磁带录相机、打印机和照相机等。

雷达干扰 利用各种干扰设备和器材辐射、反射、散射或吸收电磁能量,阻碍雷达的正常工作或降低雷达的效能,使其不能正常检测有用信息或跟踪目标,以达到降低雷达控制武器的精度的目的。按照产生机理,干扰可分为有源干扰和无源干扰两类。有源干扰是由专用的干扰发射机辐射干扰电磁波。无源干扰是利用干扰器材对电磁波的散射或吸收特性产生干扰电磁波或改变目标回波的特征,达到干扰雷达的效果。完善的干扰系统往往综合采用多种干扰手段。

雷达有源干扰 雷达接收机接收目标回波,同时也接收频率相同的干扰信号。雷达有源干扰就是增加雷达接收机的噪声,降低其信杂比,增加对有用信号检测的不确定性,或者增加接收机的虚假信息,提高数据的错误率和虚警率。雷达有源干扰分为压制性干扰和欺骗性干扰两类。

① 压制性干扰: 增加接收机的噪声,甚至淹没其目



雷达侦察设备组成简图

标回波,使受干扰雷达的显示器不能显示目标信息或不能提取正确的数据,甚至使接收机饱和,失去检测信号的能力。噪声调制干扰是常用的典型干扰样式,通用性强,对多种雷达体制都有较好的干扰效果。压制性干扰分为窄带瞄频式干扰、宽带阻塞式干扰和扫频式干扰。瞄频干扰是集中能量有效地使用干扰功率,但同一时间只能干扰一部雷达。阻塞式干扰同时能干扰频带内的多部雷达,但功率分散。扫频式干扰兼有两者的特点,适宜于对付多威胁信号环境,但扫频速度必须选择得当。干扰方程是设计和应用雷达对抗设备的依据,它的形式是

$$\frac{P_j}{P_r} = \frac{P_j G_j 4\pi D_R^4}{P_R G_R \sigma_0 D_j^2} F^2(\theta, \phi) \frac{\Delta f_r}{\Delta f_j} r_p \cdot 10^{-0.1\beta(2D_R - D_j)} \geq K_j \quad (4)$$

式中 P_j 、 G_j 分别为干扰发射机输出功率和天线增益; Δf_j 为干扰频谱宽度; r_p 为干扰天线极化系数; σ_0 为目标有效散射面积; D_j 为雷达站和干扰站的距离; P_R 、 G_R 分别为雷达发射机输出功率和天线增益; Δf_r 为雷达接收机线性部分通带宽度; $F(\theta, \phi)$ 为雷达天线场辐射方向图归一化函数; K_j 为有效压制给定雷达的压制系数; P_j 、 P_r 为雷达接收机输入端的干扰功率和信号功率; β 为大气对电磁波的衰减系数(分贝/公里); D_R 为雷达与目标的距离。如干扰机和所掩护的目标在同一处(如机载干扰机),并忽略大气衰减的影响,则 $D_R = D_j$, $F(\theta, \phi) = 1$, $\beta = 0$, 干扰方程可简化为

$$\frac{P_j}{P_r} = \frac{P_j G_j 4\pi D_j^2}{P_R G_R \sigma_0} \cdot \frac{\Delta f_r}{\Delta f_j} \geq K_j \quad (5)$$

当 P_j/P_r 比值大于或等于 K_j 时,干扰才是有效的。不同工作体制的雷达,对不同的干扰样式, K_j 值不同。因此, K_j 值也是衡量干扰调制信号质量和雷达抗干扰性能的一个重要参数。当 $\frac{P_j}{P_r} = K_j$ 时,可求得最小有效干扰距离 D_{jmin} ,在战术使用和技术设计中它是一个较为重要的参数。

② 欺骗性干扰:模拟敌方雷达目标回波,经过干扰调制,逐步改变其有关参数,使雷达操作员或自动判别系统作出错误的判断,增大控制武器的误差。根据对雷达的干扰作用,欺骗性干扰可分为距离门跟踪欺骗、角度跟踪欺骗、速度门跟踪欺骗和假目标欺骗等多种。欺骗性干扰主要采用转发式和应答式两种干扰体制。欺骗性干扰的特点是隐蔽性好、设备体积小、重量轻,适于各种载体使用。

雷达无源干扰 无源干扰常用的器材有箔条(干扰丝)、各种角反射器、假目标和雷达诱饵、反雷达涂层等。干扰丝一般有金属箔或涂覆导电层的玻璃纤维、卡普纶等介质制成的偶极子反射体,对电波具有散射特性。连续投放可以形成干扰走廊或干扰云,目标在其中运动,回波信号便被淹没。适时断续投放,可使雷达跟踪干扰而丢失目标,称为欺骗性干扰。角反射器一般有各种形式,如三角形角反射器、圆形角反射器、方形角反射器、伦伯透镜角

反射器和双锥角反射器等,能增强对电波的反射,一般用于模拟较大目标的回波,制造假目标。假目标和雷达诱饵,多用于突破敌方雷达防御系统,阻碍敌方对目标的识别和跟踪。反雷达涂层,涂敷在目标表面上,改变目标的雷达散射面积或空间媒质的电性能,减小目标对雷达电波的反射,降低雷达的探测能力。无源干扰的特点是通用性强,制造简单,使用方便,因而长期受到重视。

(李信谦)

leida duikang xitong

雷达对抗系统 (radar countermeasure system)

由雷达侦察或称对抗支援设备和干扰设备组成的统一协调的系统,或是以上述系统为基础,与其他各种不同的系统组成的综合系统。这种系统能实时地截获辐射源,进行分析和威胁识别,估价电磁环境和选择最佳干扰样式,适时地施放干扰,破坏雷达的有效工作,从而降低敌方武器系统和防御系统的效能。

在雷达对抗中,常用雷达侦察定位的方法确定辐射源的位置,并以炮火、炸弹、导弹摧毁辐射源。习惯上,人们把这种措施称为“硬打击”;而用雷达干扰破坏辐射源正常工作的措施,则称为“软打击”。“硬打击”武器只能一次性使用,适用于对付敌方少数重要的电子设备。“软打击”的大部分电子对抗设备都可重复使用。当敌方雷达装备的数量多,即使摧毁其中一些也难于达到破坏敌方防御的目的时,首先使用“软打击”,使其大部分雷达失效,仅对少数雷达施行“硬打击”。

使用单一的对抗设备,不能对付各种不同体制的雷达。只有将多种设备有机地综合成雷达对抗系统才能克敌制胜。

性能 雷达对抗系统应具备的主要性能有:①在密集信号环境中,能迅速截获辐射源,进行分析、威胁识别、估价电磁环境和告警。②能选择最佳措施,实施对抗。在变化的电磁环境中,能根据情况确定对策。例如,作战初期,用有源干扰和无源干扰破坏敌方雷达对己方目标的监视和截获。当敌导弹跟踪己方目标时,要能破坏雷达的跟踪,使导弹偏离目标。③能与其他系统配合使用。雷达对抗系统是战术进攻和防御武器系统的重要组成部分。它通过计算机与通信对抗系统、光电对抗系统相配合,组成综合的电子对抗系统。雷达对抗系统能通过通信线路与通信、导航等其他电子系统和武器系统相配合,在作战指挥系统的指挥下,协同作战。④具有功率管理能力。在作战中,对目标的攻击可能是多批次的,且来自多个方向。为了有效地利用干扰功率,对抗系统必须对干扰功率进行管理和适时分配,根据威胁信号的轻重缓急,在适当的时间、适当的方位和准确的频率上,使用干扰功率和最佳干扰技术,以对付不同方向上的或同一方向的多个威胁。⑤具有系统自检能力,能及时发现和排除故障,缩短修复时间。

种类 通常使用的雷达对抗系统有地面雷达对抗系统、舰载雷达对抗系统和突防作战雷达对抗系统。

地面雷达对抗系统 用于防空和地面防御。在防空系统中,系统的雷达对抗支援设备能在雷达发现目标之前截获信号,通过对信号特征参数的分析,确定目标的类型和方向。将这些信息同雷达所获得的情报相结合,指挥系统便可作出决策,是对敌机雷达系统实施干扰,阻止它接近目标;还是以歼击机进行拦截。当敌机进入防御空域时,干扰其空地导弹制导雷达,降低空地导弹命中率;并干扰其轰炸瞄准雷达,使之不能对目标准确投弹。当突防敌机为了避开防空雷达而低空进入时,可干扰其地形跟踪、回避雷达,迫使敌机爬升飞行高度,以便雷达发现目标,并控制武器进行攻击。

在地面防御中,主要对付地面战场监视雷达和炮位侦察校射雷达,使其不能监视战场情况和不能对发射的火炮实施定位。

舰载雷达对抗系统 用于对付舰舰和空舰导弹的制导和末制导雷达,以及机载、舰载火控雷达。在舰艇防御中,对付舰舰导弹和空舰导弹的末制导雷达比较复杂,因为从发现末制导雷达工作到导弹击中目标之间时间很短。在对抗导弹末制导雷达时,通常采取的措施有:①无源干扰和有源干扰结合,当发现已被导弹跟踪,在导弹接近时发射箔条云,同时舰艇进行机动回避,而导弹被引导至箔条方向。这适用于小型舰艇。中型、大型舰艇机动性能差,在导弹未跟踪目标之前,发射干扰物,使其在末制导雷达测角的宽度中,离舰艇一定距离处展开。当导弹已跟踪目标时,采用箔条与干扰机协调工作的办法。有源干扰机先干扰,同时,舰艇机动回避。当箔条展开后,有源干扰机关机,将导弹引向箔条假目标。②有源干扰与速射炮相配合,发现导弹后,指挥系统对有限的反应时间合理分配。从发现导弹到有源干扰机开机前,由火控雷达获得目标参数。有源干扰机实施干扰,同时由指挥仪解算目标运动要素,待干扰结束后,再核对目标参数。

由于受视距的限制,舰艇上的雷达对抗支援设备不能及早发现掠海面飞行的舰舰导弹和空舰导弹,这会增加防御的困难。当利用舰载直升飞机或其他飞行器执行雷达对抗支援任务时,其机动性和高度扩大了雷达对抗支援设备的警戒范围,能提前截获辐射源,并进行分析、威胁识别和及时告警。通过数据传输系统将目标的数据传送到舰内作战指挥中心。为了扩大对攻击舰艇的导弹的防御范围,有时还在舰载直升飞机上装备雷达干扰设备,使之成为远距离的雷达对抗平台。

突防作战雷达对抗系统 它的内容包括:①远距离支援:专门的支援飞机飞行在前沿敌方导弹射程之外,施放有源干扰或投放无源干扰物,在一定空域产生干扰扇面或箔条走廊,干扰警戒雷达、截获雷达,掩护攻击机突防。这种支援措施要求干扰机具有大的功率。②随队支援:装有雷达对抗系统的支援飞机和攻击飞机编队飞行,为攻击机护航。为了更好地护航,支援飞机的性能应与攻击机相近。它的作用主要是用于干扰压制导弹制导雷达、末制导雷达和火控雷达。③自卫式:作战飞机配备有雷

达对抗系统。用于对付导弹制导雷达、末制导雷达和火控雷达,以保护自身的安全。雷达对抗系统着重测定制导雷达的参数,并核对原先所掌握的参数。如有变化或出现新的情况,立即修改和补充,以期接战时实施有效干扰。同时,测定制导雷达站的位置,以便突防时为摧毁辐射源提供数据。

通常,在突防时将远距离支援、随队支援和自卫式雷达对抗系统三者组合成突防的综合雷达对抗系统。

(顾岩岗 李光综)

leida fasheji

雷达发射机 (radar transmitter) 为雷达提供大功率射频信号的无线电装置。它所产生的射频能量经雷达馈线系统传输到雷达天线并辐射到空间。发射信号本身不具有信息,但为雷达获取目标和环境信息提供载体。发射机一般具有高频、高压、大功率的特点,它是雷达系统中最大、最重和最昂贵的部分。

分类 按调制方式,发射机可分为连续波发射机和脉冲发射机两类。连续波发射机工作在连续波状态,有时采用频率调制和相位编码等调制形式;脉冲发射机工作在脉冲状态,通常采用幅度调制。按工作波段,发射机可分为短波、米波、分米波、厘米波、毫米波发射机。大多数雷达发射机都工作在微波波段。按产生信号方式,发射机可分为单级振荡式发射机和主振放大式发射机。

组成 单级振荡式脉冲发射机(图1)由一级射频振荡器和脉冲调制器组成。射频振荡器产生大功率的射频

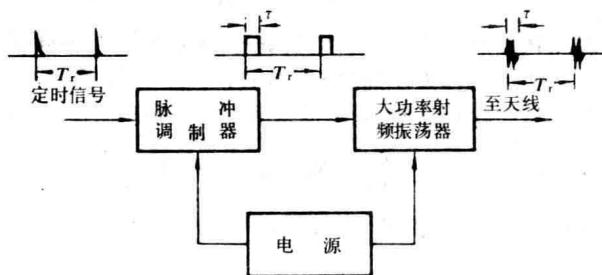


图1 单级振荡式发射机

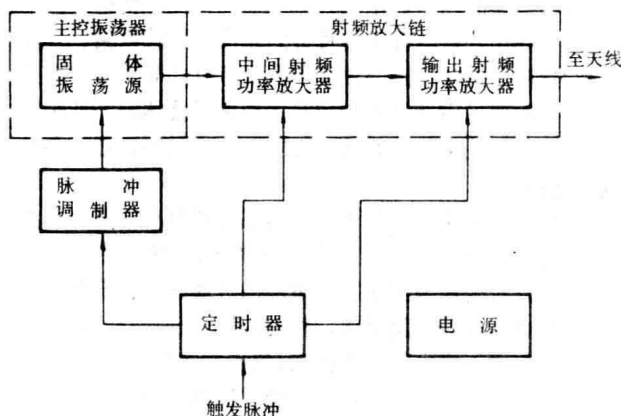


图2 主振放大式发射机

振荡,脉冲调制器产生一定振幅、宽度、重复频率和具有一定功率的视频脉冲以控制射频振荡器。在脉冲期间,射频振荡器工作,产生射频脉冲;在脉冲休止期间,射频振荡器不工作。

主振放大式发射机由脉冲调制器和放大链组成(图2)。一般由晶体主振控制的频率合成器(见频率合成)产生一低功率、但频率很稳定的射频振荡,经过一级或多级脉冲调制的功率放大器变成所要求的射频大功率脉冲。定时器协调各级脉冲调制器的工作。

性能 发射机在工作波段、带宽、输出功率、效率、脉冲宽度、重复频率、信号稳定度、信号波形、可靠性和成本等方面应满足雷达系统的要求。

工作频率或波段 发射机的工作频率依雷达的用途而不同。为了提高雷达系统的工作性能和抗干扰能力,有时还要求具有一定的瞬时带宽。工作频率或波段的选择对发射机的设计影响很大,首先涉及到发射管种类的选择。在1吉赫以下,主要采用微波三、四极管;在1吉赫以上,采用磁控管、速调管、行波管和前向波管等。发射管种类不同会影响调制器和电源的设计。

输出功率 它直接影响雷达的威力和抗干扰能力。脉冲雷达发射机的输出功率又分为峰值功率和平均功率。一般说来,决定雷达作用距离的是平均功率而不是峰值功率(更确切地说是可投射到目标上的总能量)。

效率 发射机输出的平均功率与输入功率之比。发射机是雷达中耗电最多的部件,所以发射机应具有尽可能高的效率。

脉冲宽度 发射机脉冲工作的时间。当发射机脉冲功率和重复频率一定时,脉冲宽度越宽,雷达的作用距离越远;另一方面,脉冲内信号频谱宽度与雷达对目标的鉴别力有关,它决定两个被探测目标间能分辨的最小距离。

脉冲重复频率 发射机在一秒钟时间内所发射的工作脉冲的个数。脉冲宽度与脉冲重复频率的乘积称为雷达发射机工作比,通常它远小于1。

信号稳定度 信号的各项参数,如信号的振幅、频率(或相位)、脉冲宽度和脉冲重复频率等随时间而发生不应有变化的程度。信号的任何不稳定都会给雷达整机性能带来不利影响。信号参数的不稳定性分为规律性与随机性的两类。规律性的不稳定性往往是由电源滤波不佳、机械震动等原因引起的;随机性的不稳定性则是由发射管的噪声和调制脉冲的随机起伏所引起的。

信号波形 与能运载的信息量有直接的关系。因此,研究发射信号的波形十分重要(见雷达波形)。信号按信号模糊图的不同形状分为四类:固定载频脉冲信号、线性调频脉冲信号、等间隔脉冲列信号和二位相位编码信号。对应不同的信号波形,发射机有不同的组成。

对发射机除上述主要电性能要求外,还有结构上、使用上和其他方面的要求。结构性能包括发射机的体积重量、通风散热、电磁屏蔽、防震防潮和调整调谐等。使用性能包括控制监视和检查维修的方便,保证安全可靠等,特

别是对微波功率管、调制管和波导系统打火的防护。

发射机型式 设计雷达发射系统时,最基本的选择是采取振荡管型发射机还是放大管型发射机。单级振荡式发射机的优点是简单、经济和轻便,但频率稳定度较差,难于产生复杂信号,在相继的射频脉冲之间不能保持相位的相干性。简单的常规脉冲雷达多半采用单级振荡式发射机,只要性能能满足要求,新型雷达也尽可能采用这种发射机。但是,对于脉冲多普勒雷达和脉冲压缩雷达等,则需要采用多级放大式发射机。多级主振放大式发射机产生的射频频率极其稳定,相继脉冲间可保持相位的相干性,因此便于雷达充分利用回波的相位信息。在新型雷达中,已越来越多地采用多级主振放大式发射机。

在多级放大链的实际应用中,首先遇到的问题是管链形式的选择。设计人员一般是根据雷达总体的要求对各种微波放大管的所有主要参数,如功率、脉冲宽度、中心频率、带宽、增益、效率、工作电压、稳定度、噪声、聚焦方式、冷却方式等进行最佳的折衷选择,以便确定所采用的管链。常见的有晶放-行波管放大链和以晶体作主振的行波管-前向波管链、行波管-速调管链、固态功率放大链等。另外,定时、级间隔离、电平校准、稳定度的预分配、高频泄漏等也是设计中考虑的重要问题。

脉冲调制器 雷达发射机广泛采用脉冲调制器。脉冲调制器由电源、能量储存和脉冲形成三部分组成(图3)。常用的脉冲调制器主要有两种:刚性开关的电容储能

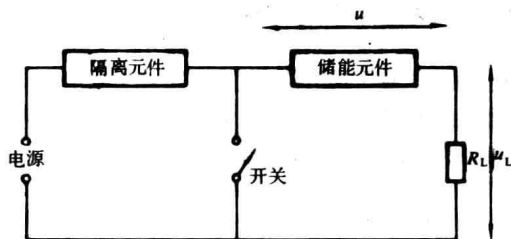


图3 脉冲调制器基本电路

放电式调制器和软性开关的线型调制器。前者的特点是对脉冲宽度和重复频率有很大的适应性,并且有良好的输出脉冲波形,但结构比较复杂,效率较低;后者效率高,结构比较简单,采用截尾技术等可大大增强对负载阻抗的适应能力,但脉冲波形不如前者的好,而且由于放电管恢复时间的限制不宜用在脉冲间隔短(小于100微秒)的场合。此外,在某些功率不大、稳定性不高的雷达中有时还采用磁调制器。

趋势 提高抗干扰性能、可靠性和自适应控制,是雷达的主要发展趋势。因此,在完善机械调谐的频率捷变磁控管的同时,加强对大功率的无惯性电子调谐脉冲磁控管的研究,并采用注入锁相技术,遂成为重要课题。新体制雷达越来越多地采用主振放大式的发射机。行波管-前向波管、固体微波源-行波管和全固态放大链在雷达中将得到更多的应用。发射机将越来越多地使用微处理机,以便向自适应方向发展。

(金事章 蒋光庆)