

# 一九八〇年国际雷达会议录（上）

四机部雷达情报网



# HR-76火控雷达\*

Lee E. Kitchens

**提要** 为了满足舰载雷达的宽频谱战术要求,已设计和建造了HR-76火控雷达,天线座采用高强度的轻型材料,并在环境保护装置中引入现代集成电路数字技术。雷达的所有主要功能都在计算机的控制下:距离、方位和仰角跟踪环路都通过计算机闭合,目标探测和截获都由软件来实现。

HR-76 雷达目前正作为舰载火控系统的一个组成部分进行工作,提供海面 and 空中目标的单脉冲雷达跟踪、同时跟踪目标和导弹以提供武器瞄准或制导控制信号、海面搜索以及直接火力支援。HR-76 雷达包括动目标显示、自动探测、舰只运动的稳定以及各种电子反干扰措施。

## 引言

HR-76 火控雷达为一种轻型全固态系统(发射机除外),采用最新的数字技术,操作功能高度灵活。该雷达的所有主要功能都在计算机的控制下。雷达在正常工作方式下是自动运转的,此外还可选用人工干预。

作为美国无线电公司单脉冲精密跟踪雷达系列(继数字测量雷达AN/TPQ-39之后)的最新产品,HR-76加了一些附加功能,以满足今天的复杂战斗环境对现代武器系统的要求。这种系统如图1所示。整个雷达的重量小于3000磅,其中包括装在甲板上的指挥仪和保护罩的重量450磅。重量轻和体积小,使该系统十分适合于安装在小型高速巡逻艇以及较大的舰只上。

表1的系统基本性能参数表明,远程高精度性能与舰载系统的功率、重量和所占空间要小的要求结合在一起。

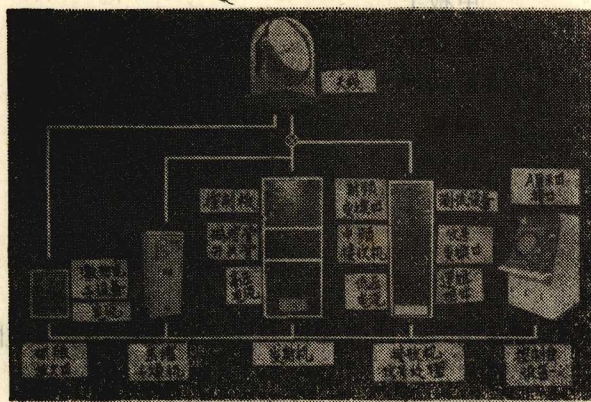


图1 HR-76火控雷达系统

\* "The HR-76 Fire Control Radar" 1980, pp.1-7(毛仁麟译,王立鸿校)

表1 HR-76 系统参数

|            |                                                                                                             |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 性能综合       |                                                                                                             |
| 截获距离       | 40公里 (对1米 <sup>2</sup> 目标)                                                                                  |
| 跟踪距离       | 40公里 (对1米 <sup>2</sup> 目标)                                                                                  |
| 精度 (20公里时) |                                                                                                             |
| 距离         | 10米                                                                                                         |
| 角度         | 1 毫弧度                                                                                                       |
| 搜索扫描周期     | 4 秒                                                                                                         |
| 反应时间       | 对海面目标从截获到跟踪平均为3.5秒                                                                                          |
| 环境         |                                                                                                             |
| 甲板上        | 风力: 每小时75海里<br>温度: -28℃~75℃<br>冲击: 75g (峰值), 6 毫秒脉冲<br>振动: 1.3g (平均), 5~33赫<br>炮弹爆炸: 5 磅/英寸 <sup>2</sup> 超压 |
| 甲板下        | 温度: 0℃~50℃<br>冲击: 25g (峰值), 11毫秒脉冲<br>振动: 1.3g (平均), 5~25赫                                                  |
| 系统重量       |                                                                                                             |
| 甲板上        | 450磅                                                                                                        |
| 甲板下        | 2500磅                                                                                                       |
| 所需功率       |                                                                                                             |
| 60赫        | 13千瓦                                                                                                        |
| 400赫       | 2 千瓦                                                                                                        |

## 系统设计考虑

任何系统的设计都是技术要求、主观愿望和实际限制的平衡。HR-76 火控雷达任务的最低要求是:

1. 截获和跟踪40公里处的飞机
2. 搜索和探测最远距离的舰只
3. 在武器作用范围内精度达1毫的弧度

影响这些要求的三个主要设计参数是天线尺寸、工作频率和角跟踪型式。

天线应做得大, 以便达到高增益、高精度和抑制多路径与杂波干扰。另一方面, 天线直径应做得小, 以便减少天线和天线座的重量, 天线座重量往往与天线直径的三次方成正比。天线小还降低了敌方雷达发现被保护舰只的概率。对 HR-76 雷达来说, 所选择的是能给出所要求跟踪精度的最小直径的天线。

雷达频率影响天线增益、天线波束宽度、雨中传播损失以及雨的后向散射。当天线尺寸固定时, 一个G波段(5千兆赫)系统可能传播损失低和雨的后向散射小, 但要以降

低天线增益和增大波束宽度为代价。K波段(35千兆赫)系统可给出跟踪所需的极高天线增益和窄波束宽度,但雨中传播损失和雨的后向散射都很高。最后,选择X波段(9千兆赫)系统作为最佳的折衷方案。为了达到所需跟踪性能,选用0.84米口径的反射器天线。

至少有三种类型跟踪接收机可和单脉冲天线系统一起使用。采用三通道单脉冲接收机可以得到最佳性能,这种接收机在每个脉冲上都给出仰角、方位和距离数据。但是,三个通道在幅度和相位上都必须仔细匹配,如果有一个通道不能做到,就不能完成跟踪。另一个极端情况是单通道“顺序波瓣”接收机。采用单通道接收机省去了多路匹配的要求,但是为了得到一组完整的数据,需要四个脉冲。介于这两种极端情况之间的是双通道接收机,其用两个脉冲来取得全部信息。由于和加误差与减误差信号是同时测量的,目标幅度闪烁不会引起误差。通道不需要精确匹配,而且即使有一个通道完全不起作用,该系统仍能继续工作,其性能不比顺序波瓣雷达差。为此,选用了双通道角跟踪系统。

## 系 统 介 紹

HR-76 雷达系统的主要部分(如图1所示)有:带天线罩的天线、发射机、接收

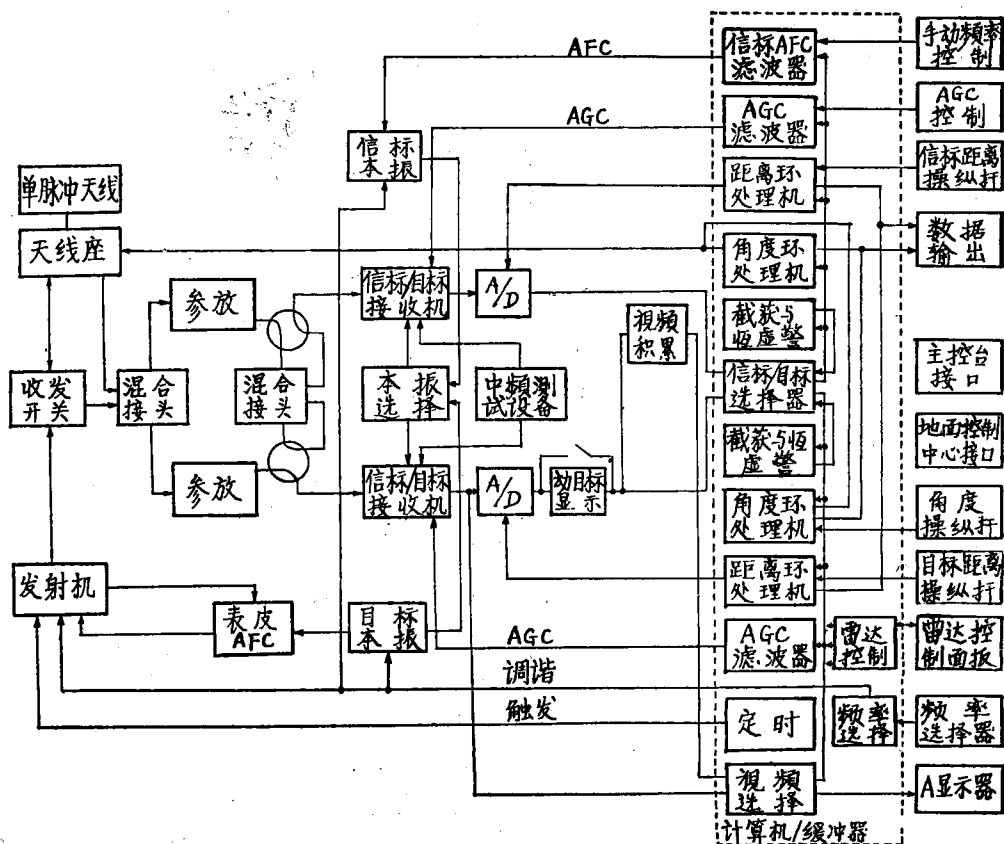


图2 HR-76系统方框图



机和信号处理机,以及操作员控制台内的自动和人工控制设备和雷达计算机。电源要求是三相 115/208 伏 60 赫和 400 赫,额定功率 13 千瓦。

图 2 示出 HR-76 雷达的主要功能。应指出,所有环路都是通过计算机闭合的,计算机还与外部控制信号相连接,其中包括制导指令数据、来自搜索雷达或光学指挥仪的指示、操作员控制台的遥控信息以及射频指示。

根据目标情况的不同,双通道接收机既可用于常规单脉冲工作方式,也可用于顺序波瓣工作方式。目标接收机通道包含一个动目标显示处理机。用于顺序信标跟踪的第二通道不需要动目标显示,因为信标的接收频率偏离其发射频率。

当不需要动目标显示器时,该系统采用常规单脉冲。在这种情况下,通过在各发射脉冲之间交替进行角测量,并把双通道接收机用于常规单脉冲处理,就能既跟踪目标也跟踪信标。

跟踪低空目标采用了一种专门方法:使天线保持固定,并把天线主波束抬高到超出地球表面,使得多路径信号由天线旁瓣接收到。于是,利用主波束轴作为一固定基准对目标作偏轴跟踪。当目标升高到超出低仰角区时,该系统恢复到正常的闭环跟踪。

动目标显示器是一种数字式杂波锁定装置,它能透过运动的海面杂波或风吹动的雨和箔条进行工作。动目标显示杂波衰减滤波器能控制扩展杂波的速度跟踪闭环环路。该动目标显示器主要用来对付雨杂波,对付海杂波通常不需要它。

#### 一. 电子反干扰特点

电子反干扰是 HR-76 火控雷达设计中一个主要考虑的问题,它具有下列固有特点:

1. 抖动的脉冲重复频率。如果雷达脉冲重复频率是恒定的,干扰机能在目标距离单元内产生一个脉冲,然后使它超前或滞后于目标距离单元,以便俘获距离跟踪器。HR-76 雷达采用了抖动脉冲重复频率,因此干扰机只能使一个脉冲位于目标距离单元内或在目标距离单元以外。由于采用前沿跟踪,该雷达能阻止干扰机偷取波门的企图。

2. 频率转换。瞄准式干扰机(噪声能量集中在一个足以复盖雷达接收机频带的宽度内)会严重限制雷达性能。HR-76 雷达用可调谐发射机来避免这个问题,这种可调谐发射机容许在整个工作频段内快速变化频率。

3. 对海面目标的无源制导。对海面目标来讲,无论是瞄准式干扰还是宽带阻塞干扰都不能有效地对付 HR-76 系统。噪声干扰破坏了雷达距离信息,但它却提供了准确的角度信息,在这种情况下,雷达可以对通带内的一个目标辐射进行无源角跟踪。如果该干扰机是一个瞄准式干扰机,它遮掩了目标回波,但不遮掩导弹回波,则雷达对导弹的跟踪可与对目标的无源跟踪一起使用。如果干扰机既遮掩目标也遮掩导弹回波,则雷达对目标进行无源跟踪,并用光学指挥仪来确定导弹的角位置。

4. 恒虚警和灵敏度时间控制。在带有自动门限检测的雷达中,噪声干扰信号可能使虚警率提高至搜索工作方式所不能允许的值。HR-76 雷达通过自动控制接收机增益满足一固定虚警率来抵消这种效应。恒虚警系统控制最大距离上的接收机增益。在较近的距离上,灵敏度时间控制电路按照标称的  $R^{-4}$  定律来降低接收机灵敏度,以便减少由干扰或小型虚假目标(例如鸟)引起的虚警。

5. 杂波(箔条)锁定动目标显示。这种动目标显示系统的主要特点是能够跟踪平均速度,因而能从风吹动的箔条中滤出信号。

6. Dicke Fix 电路、扫描积累器和脉宽鉴别器。该系统在搜索工作方式中包括一个 Dicke Fix 电路,以防止检测单个强干扰脉冲,并使由快速扫频干扰机引起的干扰。减至最小。扫描积累器使得低占空系数脉冲干扰机不致引起虚警,除非它们与雷达同步。快时间常数电路能减少低于饱和电平之长干扰脉冲的影响。

## 二. 自测试技术

已设计和制造出具有计算机控制的多种机内测试特点的 HR-76 雷达。无论联机还是脱机,自动测试都是由信号处理机柜内的测试单元控制的。该测试设备包括一个模拟目标信号和杂波的中频信号产生器,再加上一个机内噪声源,以便简化雷达动态条件的测量。

系统操作功能和状态的检查,以及故障检测和隔离分三个级别完成,即正常工作期间的联机监控;自动脱机故障检测和利用测试设备和战术操作程序结合的自动和半自动检测。

在系统正常工作期间,机内测试设备(BITE)监控系统的19个关键单元,并向操作员报告每个单元的正常/不正常状态。不正常状态就在控制台上触发一次警报。然后,操作员可以调出一个字母数字显示图,以便确定准确的故障源。

在维修期间,机内测试设备可以脱机方式工作,完成整个 HR-76 系统内各种处理和操作功能的13种动态测试。设计这些测试是为了向维修技术人员提供一种方法,用来发现功能故障、并把故障隔离到中间维护级可更换单元。

## 三. 系统特点

表2. 列出了 HR-76 的主要特点,而表3概括了雷达的参数。

表2 HR-76 雷达特点

1. 具有自动检测的海面搜索
2. 单脉冲跟踪
3. 分别的目标和武器跟踪环路
4. 专用的低仰角跟踪
5. 杂波锁定动目标显示
6. 全固态(发射机和阴极射线管除外)
7. 快速频率选择
8. 采用软件的灵活性
  - a. 距离、方位和仰角跟踪环路通过计算机闭合
  - b. 计算机内检测和截获逻辑
  - c. 软件的跟踪和制导算法
  - d. 经由计算机自动和人工控制雷达
9. 电子反干扰措施包括恒虚警、快时间常数、抖动脉冲间隔、快速调谐、箔条杂波锁定动目标显示

表 3 火控雷达参数

|        |                                                    |
|--------|----------------------------------------------------|
| 天线     |                                                    |
| 反射器    | 33英寸抛物面                                            |
| 馈源形式   | 卡塞格仑                                               |
| 极化     | 垂直, 线性                                             |
| 波束宽度   | 2.7°                                               |
| 增益     | 34分贝 (频带中心)                                        |
| 发射机    |                                                    |
| 形式     | 脉冲调制磁控管                                            |
| 工作频段   | 8.5~9.6千兆赫                                         |
| 峰值功率   | 250千瓦 (额定)                                         |
| 脉冲宽度   | 0.25、0.5或1.0微秒                                     |
| 脉冲重复频率 | 1 微秒时为1000赫, 0.5微秒时为1200~1800赫, 0.25微秒时为2400~3000赫 |
| 接收机    |                                                    |
| 形式     | 双通道单脉冲                                             |
| 噪声系数   | 接收机内为 4 分贝                                         |
| 动目标显示器 |                                                    |
| 形式     | 杂波锁定                                               |
| 实现方法   | 数字视频                                               |

## 设 备 介 紹

下面各节概略介绍 HR-76 雷达系统的主要部件。

### 一. 天线和天线座

HR-76 天线为一个带卡塞格仑馈源的33英寸直径的抛物面主反射器。馈源为美国无线电公司的带有单脉冲比较器的四喇叭馈源 (见图 3), 给出三个常规单脉冲通道: 方位差、仰角差及和通道。该馈源系统设计成垂直线极化。表4列出天线物理和性能特点。

表 4 天线座主要参数

|      |                         |
|------|-------------------------|
| 频段   | 8.6~9.4千兆赫              |
| 反射器  | 直径33英寸                  |
| 波束宽度 | 2.7°                    |
| 增益   | 34分贝 (频带中心)             |
| 馈源形式 | 卡塞格仑, 单脉冲               |
| 天线旋转 | 方位: 连续<br>仰角: -30°~+85° |

对舰载用途而言, 用天线罩 (陆上结构不需要) 来保护天线和天线座免受阵风负荷

和风吹浪花的侵害。下部的固定天线座组件与带动天线在方位上转动的上组件之间的电气连接采用滑环。为了与天线的仰角运动相适应，采用软电缆。

仰角和方位齿轮箱向雷达电子设备提供天线指向位置数据输出。天线座上还装有速率陀螺，以便提供舰只移动时的速率信号，因此能够用宽带天线座驱动系统进行补偿，而保留窄带位置跟踪环。

天线座的单速直接驱动的仰角和方位马达由计算机驱动的固态方位和仰角伺服放大器提供动力。表 5 列出了天线座的驱动性能。每个伺服放大器都有速度和位置反馈环路。速度环路围绕转矩环路闭合，采用速率陀螺反馈，以便在跟踪期间稳定天线，使其不受舰只摇摆和俯仰运动的影响。

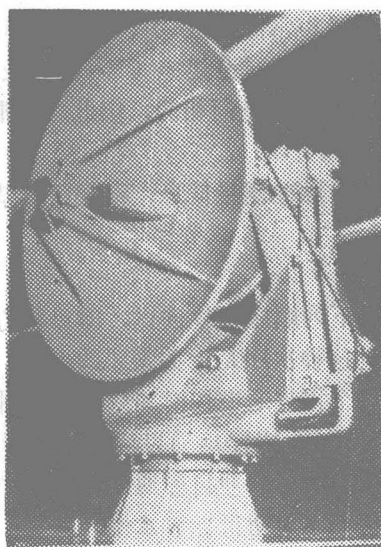


图 3 HR-76 天线座

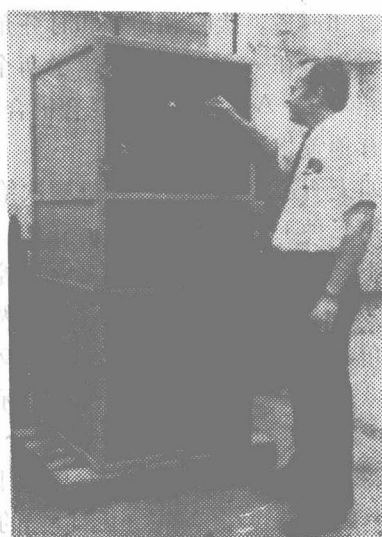


图 4 HR-76发射机

表 5 天线座驱动性能

|          | 稳 定 跟 踪            |                    | 组 合 (最 大)          |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 方位/仰角速度  | 50°/秒              | 45°/秒              | 95°/秒              |
| 方位/仰角加速度 | 60°/秒 <sup>2</sup> | 30°/秒 <sup>2</sup> | 70°/秒 <sup>2</sup> |

## 二. 发射机

发射机的快速调谐能力(图 4)是建立在采用瓦里安公司的 VMX—1313 型同轴磁控管和 VZW—9831 型自动频率控制单元的基础上。与装在磁控管上的调谐器驱动组件结合在一起，该设备可在 3 秒钟内把磁控管调谐到 8.6~9.4 千兆赫频段内 12 个预置频率中的任一个。当接收到计算机指令时，自动频率控制单元为调谐器驱动组件产生所需的驱动功率，以便调整磁控管频率。同时送一个指令到接收机本振，产生正确的接收机频



率。磁控管输出频率的抽样与稳定本振频率进行混频，给出发射机锁定信号。发射机自动频率控制单元利用这个频率锁定信号来校正由于温度引起的磁控管频率漂移和电源电压变化。

### 三. 接收机

方位和仰角差信号经由误差信号取样器实现时分多路。误差信号取样器在仰角和方位差通道或误差通道之间交替转换，给出一个(+)仰角、(-)仰角(仰角相位倒转 $180^\circ$ )、(+)方位和(-)方位输出。这种转换可以在任何速率上进行，直至雷达最大脉冲重复频率，并因此在计算机指令的任何顺序上进行。和通道和时分误差通道经由两路波导从天线发射器的背面送至仰角和方位旋转接头以及射频接收机。

和通道中的高功率收发转换环流器把发射信号引向馈源系统，并把接收的和信号送入接收和通道。接收和信号和时分角误差信号由低噪声常温参放放大后，经由可控混合耦合器组合在一起。这就给出了两个接收跟踪通道：和加时分误差( $\Sigma + \Delta$ )及和减时分误差( $\Sigma - \Delta$ )。在组合混合耦合器输入端， $\Sigma$ 和 $\Delta$ 信号是同相的，因此，在混合器之前接有预置相位校准移相器。

如上所述，双通道接收机顺次给出方位和仰角单脉冲测量信息，根据目标情况，可以采用三种工作方式：

1. 单脉冲目标跟踪—对火炮控制。

2. 单脉冲目标和信标跟踪—两种跟踪测量以下列顺序交替进行，即目标方位、目标仰角、信标方位、信标仰角，并反复进行，不过这种次序是无关紧要的。

3. 顺序波瓣—对于目标和信标跟踪来说，每个接收通道按时间顺序专门处理( $\Sigma + \Delta$ )和( $\Sigma - \Delta$ )信号，与上述两个信号并联处理相反。当需用动目标显示进行高质量目标测量时，可采用这种方法。动目标显示器用在顺序单脉冲目标通道；用第二通道的顺序单脉冲来跟踪信标。由于信标的射频偏离，它不需用动目标显示器。

用目标通道中的目标本振和信标通道中的信标本振来实现顺序波瓣工作方式。通过控制把目标本振或把信标本振接到两个接收通道的混频器，就能实现双通道单脉冲跟踪方式。

### 四. 动目标显示系统

动目标显示系统是由杂波锁定的三脉冲数字动目标显示对消器组成。杂波锁定的目的不仅是补偿舰只与杂波之间的相对运动，而且还能补偿发射机各脉冲之间的变化，因此使它等效于一个相干发射机。该系统包括接收机增益控制功能，使接收的杂波电平相对模/数变换器动态范围最佳，因此增大了截获期间的探测灵敏度，并提高了跟踪期间的跟踪精度。为了避免出现盲速，采用了参差脉冲重复频率。

在截获期间，把对消剩余信号提供给恒虚警系统，该恒虚警系统与确知截获时所用的一样。跟踪时，动目标显示器对顺序波瓣信号起作用，而距离和角度跟踪功能对动目标显示对消后的信号起作用。

对海面目标，动目标显示器采用额定的1500脉冲/秒的取样，并使脉冲重复频率参差来避免盲速。对空中目标。采用脉冲成组发射，组内脉冲具有额定的3000脉冲/秒的速率。这就为提高雨杂波抑制能力提供了一个较高的脉冲重复频率。为了填补盲速，使

脉冲间隔参差。

### 五. 计算机和信号处理

计算机和信号处理分系统(图5)为HR-76的核心部分。所有功能都在不同程度上由这个分系统来控制。它包括一个带接口电路的小型通用计算机、一些数/模变换器和一个模/数变换器、处理逻辑和精密定时器。该分系统还包括为HR-76系统研制的计算机程序(软件)。

计算机分系统由下列部分组成:

1. 小型通用计算机(AN/UYK-28)
2. 精密频率源(中频接收机中的高精度石英晶振),在计算机中对它进行处理,产生时钟脉冲、脉冲重复频率和距离定时信号
3. 磁芯存储器具有足够容量,以完成雷达的全部功能(32768个16位字)
4. 自动频率控制、自动增益控制、角伺服、距离伺服和恒虚警环路计算机输出侧的数/模变换器
5. 与取样保持电路一起用的模/数变换器,使接收视频信号数字化,供计算机使用

计算机完成下列功能:系统工作方式控制、距离跟踪、角跟踪、自动增益控制、符号、扫描产生、数据收集、自动频率控制、显示器控制、外部接口、人工控制、截获、自动伺服带宽控制、自动惯性滑行、实时动态滞后校正以及舰只姿态校正。

### 六. 控制台

指挥控制台包括操纵HR-76所需显示器和各种控制设备。控制台主要部件为:平面位置显示器、A型显示器、操纵杆、雷达控制板、灵活的计算机控制输入—输出开关矩阵、数字计算机以及接口电路和电源。

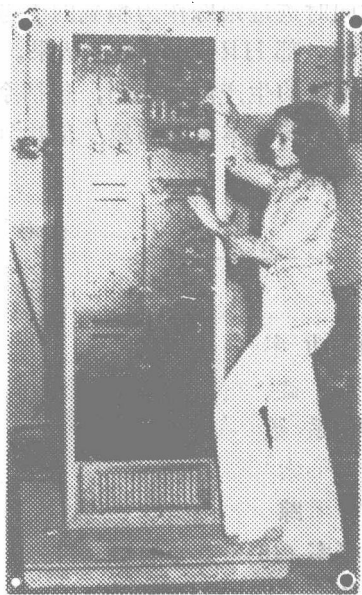


图5 HR-76 信号处理机

## 性能测试结果

每个HR-76雷达系统制造完成以后,都对该系统作全面试验,确保所有功能都满足技术指标规定的要求。除去正常的生产测试外,第一个HR-76系统接受了一些附加测试来鉴定雷达的设计参数。为了证明两个HR-76雷达能在同一艘舰上工作,已进行了一次试验。在这次试验中,两部HR-76雷达的天线座安装在相距50英尺的位置上,而电子机柜互相靠近。雷达工作在正常的截获与跟踪方式,并监视视频显示器和数字数据来取得有无干扰的指示。视频显示器上没有干扰指示,就表示同步和视频匿隐电路正

在工作。为了探讨干扰脉冲匿隐电路对系统精度的影响，就把干扰最严重时采用抗干扰措施后达到的方位误差与无干扰情况下的基本误差进行了比较。发现方位误差的增加小于 0.1 毫弧度。其它鉴定试验包括测量动目标显示器通带以及天线方向图(见图6)。所有试验都表明，该雷达满足或超过原定技术指标。

第一部产品雷达的全系统跟踪精度是对自由飞行的气球和飞机目标测试的。这些飞行试验是在精心控制的条件下进行的，并且用一部高精度AN/FPS-16测量雷达同时进进跟踪作为精确的参考源。表6列出第一部 HR-76 的测试结果。以后的雷达系统的生产测试表明，包括系统精度在内的系统基本参数与第一部达到的结果十分相近。

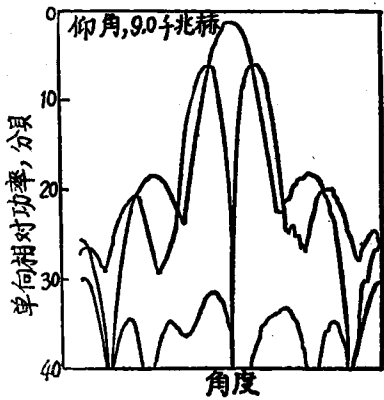


图 6 典型的天线测试方向图表明，HR-76 的性能完全超过规定水平

表 6 试验结果

|                                    | 指 标           | 测 得 值              |
|------------------------------------|---------------|--------------------|
| 峰 值 功 率                            | 181.0 千瓦 (最小) | 218.0 千瓦 (最小)      |
| 增 益                                | 32.0 分贝 (最小)  | 34.0 分贝 (最小)       |
| 噪 声 系 数                            |               |                    |
| 搜 索                                | 8.0 分贝 (最大)   | 3.7 分贝 (最大)        |
| 跟 踪                                | 8.0 分贝 (最大)   | 6.7 分贝 (最大)        |
| 发现概率 (40 公里处的 1 米 <sup>2</sup> 目标) | 90 %          | > 90 %             |
| 距离精度 (18 公里或更小)                    | 10.0 米        | 3.0 ~ 7.0 米 (典型)   |
| 方位精度 (18 公里或更小)                    | 1.0 毫弧度       | 0.5 ~ 1.0 毫弧度 (典型) |
| 仰角精度 (18 公里或更小)                    | 1.4 毫弧度       | 1.0 ~ 1.4 毫弧度 (典型) |

## 应 用

HR-76 火控雷达系统最初是为下列用途设计的，即配置单部雷达的小型高速巡逻艇以及既可采用单雷达也可采用双雷达的较大舰只。这种重量轻的天线、天线座和天线罩组件具有可安装在桅杆上的优点。工作在计算机软件控制下的这种灵活的组件化电子封装已证明 HR-76 雷达可能为其它用途所采用。

配备一个稍大一些的天线座和较高转矩的单速驱动马达，HR-76 也可用作地面雷达。在这种应用中，天线与天线座配有电视摄象可变焦距透镜，并且工作时不用天线罩。另外还计划作一些变化，使基本的 HR-76 与现代高可靠性火控雷达系统（包括连续波照射设备）的特定技术要求相适应。



# ELRA 实验性相控阵雷达系统 的自适应控制与跟踪\*

W. Fleskes, G. Van Keuk

**提要** 本文首先叙述了正在西德无线电数学研究所建造的 ELRA 相控阵雷达系统的构造, 然后介绍主控计算机的软件概念。与常规雷达情况相反, ELRA 相控阵雷达由于波束捷变使空间自由度增加, 从而有可能实现自适应搜索与跟踪。对目标的均匀扫描和固定采样时间不再是限制系统改进的因素, 而且能适用于根据最佳准则来估计一次研究活动是否成功。已给出这种准则, 并介绍了中央计算机软件结构的重要性。把系统的所有接合工作都看成是同时需要系统资源和计算时间的独立任务时, ELRA 系统采用根据工作在各种负荷情况下的优先顺序来调度的概念。

## 一、引言

正在西德韦特霍芬的无线电数学研究所进行的电扫雷达(缩写为 ELRA)计划<sup>(1)(2)</sup>是用来验证和分析相控阵技术各种问题的实验性系统。ELRA 系统本身不是为任何特定的专用设备设计的。因此, 数据处理设备为通用计算机。本文着重于在搜索和跟踪两项任务中充分利用相控阵的波束捷变能力来控制天线。

整个系统是由无线电数学研究所下属的两个部门合作建造的。包括雷达功能控制在内的天线部分是由电子设备部负责的。其研究结果业已出版<sup>(1)</sup>。本文介绍的是系统控制和传感数据情况。因此, 中央计算机和系统概貌是研究的重点。本文只限于叙述后面一部分内容。

## 二、系统结构

ELRA 相控阵系统配置成一个传感器数据处理链。它包括如下两个主要部件(图 1):

- (1) 信号处理装置(包括天线、硬布线逻辑、过程控制计算机)
- (2) 数据处理装置(包括中央计算机、显示/对话处理机、显示器)

来自天线单元的模拟信号, 经过日益先进的程控处理和数字化以后, 就进入中央计

---

\* "Adaptive Control and Tracking with the ELRA Phased Array Radar Experimental System," pp. 8—13 (周伯行译, 毛仁麟校)

算机。在波控计算机和中央计算机之间的接口上，汇集了大量信息（来自所有天线单元的幅度、相位等），而从构成一个雷达标图。这是一个包括目标的距离、方位、仰角、时间、多卜勒等的数字数据集。

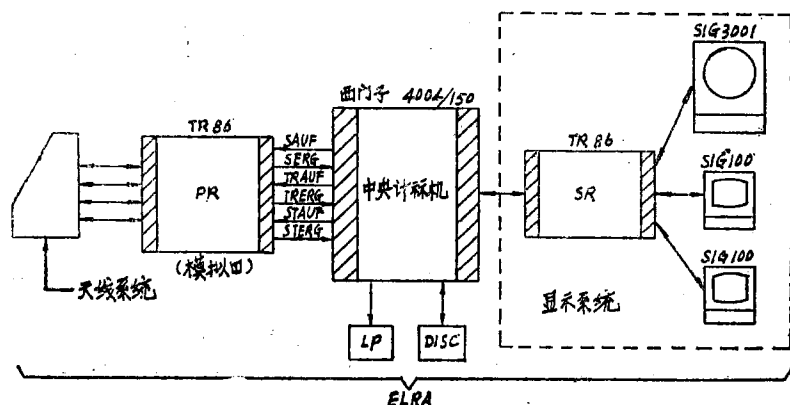


图1 ELRA 系统的配置

以高级语言程序的主控计算机必须处理来自传感器装置的数据，并把搜索、跟踪和控制指令发回天线。搜索指令使传感器在监视空域的某一范围内扫描。送到过程控制计算机的跟踪指令通常只给定一个波束的方向、距离和多卜勒波门，以及被发现和跟踪的一个目标的预期信号强度。控制指令是在与跟踪任务非直接相关的各种不同计算机之间传送各种信息所必需的。因此，就有一个返回天线的信息流，并增加了空间自由度，这是与常规机扫雷达系统不同的。ELRA 系统研究活动的管理对用户技术指标来说必须是最佳的。例如，这就意味着，在计算机中获得监视空域内目标航迹的一对一可逆变换。这里，一条航迹仅表示一个描述目标姿态及其位置、速度、高度等的数据集。这种信息传送给显示和对话分系统，在那里可进行处理以供各种不同显示方式使用。

显示/对话计算机不仅用于变换和作为显示重复存储器，而且还组织用户与中央计算机之间的对话。中央计算机内有大量参数和策略，采用显示器上的键盘就能以安排好的一种对话来联机变化它。

### 三、自适应搜索方式

与常规机扫雷达一样，该系统能以一种特定方式工作，在整个监视空域内以有规律扫描来搜索目标，但这对辐射的能量和早期目标探测来说不是最佳的。波束捷变能使波束对准存在目标或估计会出现新目标的那些搜索方向。拟定搜索策略的目的是为了缩短在监视空域内寻找目标的时间，或在军事用途中使该探测时间内目标的范围最大。在特定空域内重复搜索的次数不仅取决于目标可能运动时摄影条件的限制，而且还取决于地形地貌的情况。根据先验的或已知的信息，中央计算机能列出搜索方向或搜索单元（可能是距离门选通的）一览表，传送给过程控制计算机，并由搜索指令来控制它。作战要求（象低空飞行目标或进入监视空域的飞机等引起的明显威胁）规定了搜索的方式。

如一种方式已由过程控制计算机和天线处理后,中央计算机就能使其再次开始,或者选择另一方式。过程控制计算机可有规律地或随机地选择一组单元内的搜索方向,而不妨碍中央跟踪计算机的工作。

未能形成航迹的搜索标图被看作是虚警,但并不废弃。ELRA 系统利用它们来积累分布在监视空域内的虚警信息。这些数据用一种 TRIE 表格编排方式存贮起来,这种编排方式能对概率  $P_F$  进行实时修正和非参数估算,这种搜索标图是一个虚警图<sup>[3]</sup>。本文称这种编排为杂波图。采用这种模块,中央计算机就在所有输入搜索标图上都加有一个估算的  $P_F$  值,它用来对下一步处理进行判定。如搜索标图有低  $P_F$  值,那就以高概率把怀疑是虚警的那些标图排除在外,并使航迹启动过程开始。在后一种情况下,跟踪成功的可能性很大,因为来自无噪声和杂波区域的标图多半表示目标。另一方面,随着  $P_F$  值的增大,就愈能排除标图数据与目标的位置或多卜勒有关。一定能推测到,超过某一门限值  $P_{Fmax}$  (取决于跟踪策略),一种跟踪算法总是能找到足够的相关标图使航迹连续,但不能排除最终跟踪一个随机的游动。因此,应从航迹启动时就排除掉  $P_F$  值太高的搜索区域,并使之消隐。但是,如前所述,消隐并不是杂波图的唯一功能。

新的目标可能从监视空域的边界进入。仰角的下界就是地平线,这里,低空目标能接近隐蔽区后面的雷达站。如可得到精确描述环境轮廓的地形地貌信息,则低掠扫描方式就是探测那些目标的最佳方式。随着特定环境的改变,其轮廓可以是一条

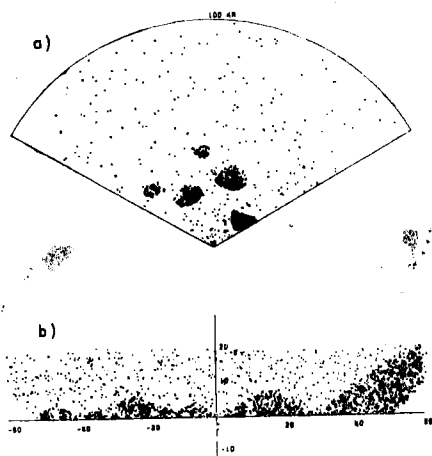


图2 a) 平面位置显示器, b) 直线显示器图象中具有虚警图的 120°ELRA 监视空域

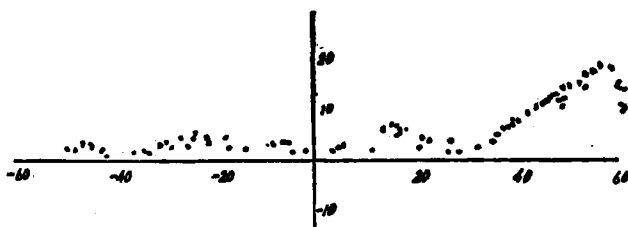


图3 自适应低掠搜索方向

简单的直线,也可是一个较复杂的图形。在 ELRA 系统中,利用图 2a 的平面位置显示器和图 2b 的直线显示器图象所描述的地面回波就自然得知这些信息。图 3 示出在直线显示器图象中自动得出的由雷达站来看的搜索方向。通过估算虚警密度的斜率就可算出这些方向。使系统运转就可得到来自地面的虚警,而不需利用动目标显示,或者选择零

多卜勒回波。

## 四、目标的分别跟踪

在 ELRA 系统中,不能采用常规机扫雷达系统所用的人们熟知的自动跟踪软件结构。这主要取决于为利用波束捷变而在中央计算机与雷达之间提供的回授。在本系统中,计算机指定数据库内收集的个别雷达数据不能根据其状态开始进行任何类型的处理,而由一种调度程序根据整个系统的状况和资源来控制各种处理过程。

### 1. 独立的标图处理

跟踪程序不应以通常的边扫描边跟踪方式工作,而应以计算机控制的方式工作。这意味着跟踪系统本身可能需有新的信息在必要时或有利时来修正或证实这些航迹。为了能以灵活方式进行多目标跟踪,每条航迹的启动过程和每条已建立的航迹都必须看成是由调度程序实现的一个独立过程。与单个航迹有关的计算机活动的主要模块如下:

- A. 目标姿态的预测
- B. 发送跟踪指令
- C. 检查数据是否已接收到
- D. 使数据与航迹相关
- E. 若数据不足,则决定下一步的活动
- F. 数据去滤
- G. 计算下一步修正的时间

对所有目标来讲,这些活动都是独立完成的,结果调度程序有并行的请求。采用这种方法,搜索、航迹启动以及单个跟踪都是完全独立的过程,扫描时间可以分别适应,而超载时的性能渐降可方便地程控<sup>[4]</sup>。

### 2. 自动航迹启动

如搜索标图中  $P_F$  的估计值小于从跟踪算法的稳定度自变量导出的上述门限值  $P_{Fm,x}$ , 则航迹启动过程开始,并给出跟踪指令,以便建立具有更多数据的航迹。但是,这些更详细的航迹标图只能以  $P_D$  的发现概率接收到,因而对跟踪指令的回答就是给出一个有回波或无回波的脉冲序列,这里的回波可以来自目标,也可以来自地物背景。由于相控阵雷达能在极短延时的情况下向目标位置发出第二次跟踪指令,因此假定  $P_F$  的估计值在跟踪开始阶段仍保持不变。对真实目标航迹的一个预先规定的概率  $P_{D1}$  来讲,可以完成一个这样的检验,即上述有标图或无标图脉冲序列是由一个目标,还是由背景噪声或干扰来解释。ELRA 系统采用序列似然比检验法,已知这种方法对固定误差概率有最小平均检验持续时间。这种检验在下列两种假设之间进行判定:

$H_1$ : 真实航迹,目标存在。

$H_0$ : 无目标,来自地物背景的回波。

这里把  $m$  个跟踪指令发生  $k$  个标图的情况下,这两个条件概率之比用作检验函数:

$$U_m = P_m(k | H_1) / P_m(k | H_0)$$



$$= [P_{D1}^k (1 - P_{D1})^{m-k}] / [P_F^k (1 - P_F)^{m-k}]$$

对每个跟踪指令都要修正这个函数,并把它和两个门限值 $h_1(m)$ 与 $h_0(m)$ 进行比较。如其中有一个门限值被超过,则相应的假设就成立,否则,检验继续进行。检验的持续时间,因而也就是主计算机和天线装置内的处理负荷是随机变量,而控制检验持续时间的期望值,就能对系统负荷进行管理。

假设引入第一和第二类误差概率:

$\alpha = P(\text{排除 } H_1/H_1 \text{ 是真实的})$

$\beta = P(\text{认可 } H_1/H_0 \text{ 是真实的})$

可以证明,只给出 $H_1$ 或 $H_0$ 的平均检验持续时间分别取决于 $\beta$ 和 $\alpha$ 。这两种参数都必须根据运算自变量来选择。假定在某些情况下,计算机负荷的主要部分是由抑制虚假航迹过程给出的,可以选取 $\alpha$ 来增大或缩短与实际观察的负荷状态相适应的这种活动的平均检验持续时间(系统负荷)。

另一参数 $\beta$ 影响认可真实目标假设时的检验持续时间。那就是得到一个经确认的航迹时,该航迹启动过程所需的时间。

在只有小杂波干扰的强目标情况下或者对杂波区内的弱目标而言,只需一个短的检验时间。但是,在难以判定的情况下,检验时间将相应增加,以得到相当的能量和计算机时间管理。

为了满足工作要求而进行参数调整以及检验工作的详细叙述可参见文献(5)。

### 3. 包括多卜勒的卡尔曼滤波器跟踪

姿态估计的跟踪算法、预测和数据相关都是雷达控制软件中对系统整个性能有重大影响的部分。另一方面,计算机用于滤波和预测的时间比用于通常的数据管理和监控时间要少得多。如果有了现代高速计算机,发展趋势是用稍复杂些的卡尔曼滤波器来解决高精度跟踪问题,按照我们的经验,这适用于以高采样率进行精密跟踪的情况。在民用的典型情况下,情况可能不同。ELRA系统在与传感器有关的坐标系中采用一个卡尔曼滤波器,这个坐标系用位置、速度和加速度来描述。有了这种与传感器有关的坐标就有可能直接实现多卜勒测量,即除距离、方位和仰角以外的第四个独立测量。除更精密的径向速度估算之外,还在排除虚假航迹和解决相关矛盾等方面取得重大进展。此外,转向探测能得到更高的灵敏度。这是很容易解释的。假设把 $\sigma$ 看成是位置噪声方差(r方向),则必定涉及到由于突然转向(以加速度 $Q$ )引起的航迹预测中的失配,以便找出估算转向探测灵敏度的一种方法。这也适用于 $r$ 的测量和预测。假设转向持续一个时间 $t$ ,而 $Q \cdot t / 6\sigma = 4$ 允许有一个明显的转向报警,则在预测位置和测得位置之间能观察到误差。此时必定计算出

$$\lambda = \frac{1}{2} \frac{Q \cdot t^2}{\sigma} = \frac{8 \sigma^2}{Q \sigma}$$

例如,令 $\sigma_r = 5$ 米/秒、 $Q = 10$ 米/秒<sup>2</sup>、 $\sigma = 100$ 米,则当上述“多卜勒检验”给

出一个明显报警时,求得 $\lambda = 0.2$ 。换言之,以位置观察为依据的转向探测器是很不灵敏的。

这种与传感器有关的坐标系的缺点是出现虚假加速度,这是因为运动的规律不再是线性的。因此,卡尔曼滤波器必须扩展,以便补偿这种非线性,而所得到的转移矩阵的结构仍然十分简单,以致与笛卡尔坐标中的普通去耦滤波器相比,其计算机时间仅需增加10%。这个小效应相当于全耦合9维空间卡尔曼滤波的4倍。尽管如此,对许多应用而言,目标动态特性的基础假设过于一般和简单。为了描述目标经过一段时间后的机动动作,目标的加速过程可以用一个高斯-马尔柯夫过程来模拟,它有零平均值,方差为 $\Sigma$ (米/秒<sup>2</sup>),而相关时间为 $\theta$ (秒)。合理选择参数,在很多情况下,将找出航迹的合适特性,但仍有一些明显误差,例如由于目标航向暂时改变而使目标飞行直线中断的情况。在这些情况中,采用了自适应程序算法,这些算法并不打算对上述参数进行估算,而是采用两种不同滤波器中的一种。

其中一种假定是直线未加速目标,而另一种假定是目标在整个时间内都作机动飞行的最坏情况。观测这种变化过程(即预测和测得结果之间的归一化误差的统计特性)的一种专用测试装置判定这一种还是那一种滤波器与目标运动相匹配。这就得到一种非常实用的自适应滤波概念。此外,相控阵的波束捷变可以用来克服由于暂时提高采样频率而使目标运动不确定的临界状态。这是采用一种顺

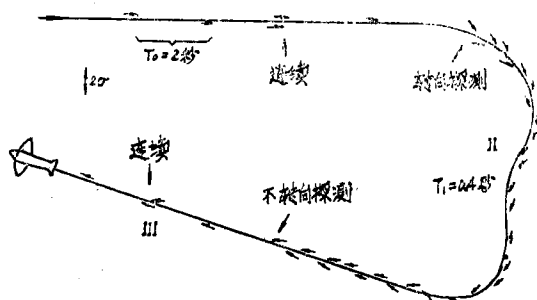


图4 转向/不转向状态下的自适应跟踪

序失配检测器来实现的,当任一种滤波器都不能用时,它就自动请求增加数据。如上所述,精密多卜勒测量也可通过观测距离门改变过程来大大提高失配检测装置的灵敏度<sup>[6]</sup>。图4用处于跟踪中的一个机动目标的典型实例来加以说明。图中可以看到转向和不转向的检测位置,航向可变的估计精度以及自适应控制的扫描间隔。

这里,应当指出,单目标跟踪法不用于密集杂波和密集目标的环境。与民用雷达相反,这样的工作条件却是军事用途的常见情况。在密集杂波环境下,航迹是连续的,因为人们熟知的航迹结束规律由于相关门内标图的高概率而失效。在这种情况下,可以用检查变化的统计特性来区分出虚假航迹<sup>[7]</sup>。对密集目标情况而言,标图与航迹相关中存在矛盾,因为飞得十分靠近的目标的相关门有相交之点。在这种情况下,ELRA系统以文献(8)中形成的一种特定方式来跟踪目标。

## 五、多目标跟踪的软件结构

正如前面已经说明,整个跟踪系统一个中央调度程序的概念是导致模块化软件系统的正常途径,这种模块化软件系统能很好地满足计算机控制目标跟踪的基本要求。搜索、