相控阵雷达传感器简介

相控阵雷达（Phased Array Radar，PAR），也称为电扫描雷达或电子扫描阵列雷达，是采用相控阵天线的雷达，[13]是一种通过控制阵列天线中各个单元的相位得到所需波束指向的雷达。[12]

雷达于 20 世纪 30 年代问世，在第二次世界大战中获得了高速发展。20 世纪 60 年代，为适应对人造地球卫星及弹道导弹观测的要求，相控阵雷达获得了很大发展。由于技术进步及研制成本的降低，相控阵雷达技术逐渐推广应用于多种战术雷达及民用雷达。[14]

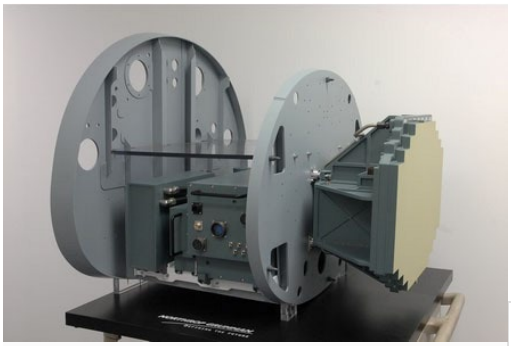
相控阵雷达的波束可以快速地从一个方向跳变到另一个方向，在每个波束的驻留时间也灵活可控。[12]相控阵雷达的发展与对雷达观测任务的需求不断增加密切相关的，雷达相关技术的进步促进了相控阵雷达的广泛应用。[13]相控阵雷达能够实现的主要功能有边搜索边跟踪功能、跟踪加搜索功能、分区搜索功能和集中能量工作功能四种。[14]相控阵雷达与采用普通阵列天线或抛物面天线的雷达相比，相控阵雷达的性能得到很大提高，工作方式可以增加，便于实现多种雷达功能，在工作环境与观测目标变化的情况下，使雷达具有很强的自适应能力。[13]它已经发展成一种重要的雷达体制，尤其是在目标探测与跟踪中受到广泛的应用。[12]

雷达概况

相控阵雷达（PAR），就是指通过相位控制电子对阵列雷达进行扫描，利用大量的个别控制的小型的天线进行单元排列，最终形成天线阵面，并且每一个天线单元都由各自独立的开关进行控制，形成不同的相位波束。相控阵的发射是以一种干涉原理形成一个将近于直的雷达主瓣，许多旁瓣的产生是因为进行组合的天线单元是不均匀的。[2]

发展沿革

相控阵技术，早在 20 世纪 30 年代后期就已经出现。1937 年，美国首先开始这项研究工作。但一直到 20 世纪 50 年代中期才研制出 2 部实用型舰载相控阵雷达。[4]



诺斯罗普公司为 F-16 开发新型 AESA 雷达

20 世纪 60 年代，美国和前苏联相继研制和装备了多部相控阵雷达，多用于弹道导弹防御系统，如美国的 AN/FPS-46、AN/FPS-85、MAR、MSR，前苏联的“鸡笼”和“狗窝”等。这些都属于固定式大型相控阵雷达，其共同点：采用固定式平面阵天线，天线体积大、辐射功率高、作用距离远。其中美国的 AN/FPS-85 和前苏联的“狗窝”最为典型。[4]

20 世纪 70 年代，相控阵雷达得到了迅速发展，除美苏两国外，又有很多国家研制和装备了相控阵雷达，如英、法、日、意、德、瑞典等。其中最为典型的有：美国的 AN/TPN-25 、AN/TPQ-37 和 GE-592、英国的 AR-3D、法国的 AN/TPN-25、日本的 NPM-510 和 J/NPQ-P7、意大利的 RAT-31S、德国的 KR-75 等。这一时期的相控阵雷达具有机动性高、天线小型化、天线扫描体制多样化、应用范围广等特点。[4]

20 世纪 80 年代，相控阵雷达由于具有很多独特的优点，得到了更进一步的应用。在已装备和正在研制的新一代中、远程防空导弹武器系统中多采用多功能相控阵雷达，它已成为第三代中、远程防空导弹武器系统的一个重要标志。从而，大大提高了防空导弹武器系统的作战性能。在 21 世纪，相控阵雷达随着科技的不断发展和现代战争兵器的特点，其制造和研究将会更上一层楼。[4]

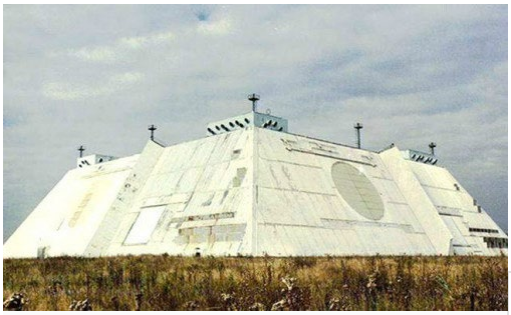
雷达类型

相控阵雷达可以分成两个种类。第一，被动无源式，简称 PESA，它是一种技术性能比较低的雷达，在上世纪 80 年代已经发展成熟，并且应用于舰艇和中小型的飞机上面。第二种，是比第一种性能更加优异，发展前景也足够好，并且技术性能也更加的高的雷达技术，这种技术是到了 90 年代末才得以应用，开始应用于战机和舰载系统的，这种技术就是“主动有源式（AESA）”。[2]

相控阵雷达分为有源和无源两类。其实，有源和无源相控阵雷达的天线阵基本相同，二者的主要区别在于发射/接收单元的多少。[6]

无源相控阵雷达仅有一个中央发射机和一个接收机，发射机产生的高频能量经计算机自动分配给天线阵的各个辐射单元，目标反射信号经接收机统一放大（这一点与普通雷达区别不大）。[6]

有源相控阵雷达的每个天线单元都配装有一个发射/接收组件，每一个组件都能自己产生、接收电磁波，因此在频宽、信号处理和冗度设计上都比无源相控阵雷达具有较大的优势。正因为如此，也使得有源相控阵雷达的造价昂贵，工程化难度加大。但有源相控阵雷达在功能上有独特优点，大有取代无源相控阵雷达的趋势。[6]



俄罗斯的“顿河”有源雷达

有源相控阵雷达最大的难点在于发射/接收单元的制造上，相对来说，无源相控阵雷达的技术难度要小得多。无源相控阵雷达在功率、效率、波束控制及可靠性等方面不如有源相控阵雷达，但是在功能上却明显优于普通机械扫描雷达，不失为一种较好的折中方案。因此在研制出实用的有源相控阵雷达之前，完全可以采用无源相控阵雷达作为过渡产品。而且，即使有源相控阵雷达研制成功以后，无源相控阵雷达作为相控阵雷达家族的一种低端产品，仍具有很大的实用价值。[6]

技术特点

功能原理

一般的雷达波束扫描是靠雷达天线的转动实现的，被称为机械扫描。而相控阵雷达是用电的方式控制雷达波束的指向变动来进行扫描发现目标的。这种方式被称为电扫描。相控阵雷达虽然不能像其他雷达那样靠旋转天线来使电磁瓣转动，一个相位一个相位地进行搜索。但它自有自己的“绝招”，那就是使用“移相器”来实现电磁瓣转动。[5]

在相控阵雷达直径为几十米的圆形天线阵上，排列着上万个能发射电磁波的辐射器，每个辐射器配有一个“移相器”，每个“移相器”都由电子计算机控制。当雷达工作时，电子计算机就通过控制这些“移相器”，来改变每个辐射器向空中发射电磁波的“相位”，从而使电磁瓣能像转动的天线一样，一个相位一个相位地偏转，从而完成对空搜索使命。例如，美国装备的“铺路爪”相控阵预警雷达在固定不动的圆形天线阵上，排列着 15360 个能发射电磁波的辐射器和 2000 个不发射电磁波的辐射器。这 15360 个辐射器分成 96 组，与其他不发射电磁波的辐射器搭配起来。这样，每组由各自的发射机供给电能，也由各自的接收机来接收自己的回波。所以，它实际上是%部雷达的组合体。如果人们把通常的雷达称作“个体户”，那么相控阵雷达就相当于一个“合作社”了。[5]

相控阵雷达使用 1 个不动的天线阵面，就可以对 120°扇面内的目标进行探测，使用 3 个天线阵面，就能实现 360°无间断的目标探测和跟踪。“铺路爪”就有 3 个固定不动的大型天线面阵，可以对 360°范围内的目标进行探测，探测距离达 5000 公里。当相控阵雷达警戒、搜索远距离目标时，虽然看不到天线转动，但上万个辐射器通过电子计算机控制集中向一个方向发射、偏转，即使是上万公里外来袭的洲际导弹和几万公里远的卫星，也逃不过它的“眼睛”。如果是对付较近的目标，这些辐射器又可以分工负责，有的搜索、有的跟踪、有的引导，同时工作。每个“移相器”可根据自己担负的任务，使电磁瓣在不同的方向上偏转，相当于无数个天线在转动，其速度之快非一般天线所能相比。正是由于这种雷达天线摒弃了一般雷达天线的工作原理，利用“移相器”来实现电磁瓣的转动，人们给它起了个与众不同的名字——相控阵雷达，代表着“相位可以控制的天线阵”的含义。[5]

美国将在日本部署的 X 波段相控阵雷达海基版

相控阵雷达相比其他的雷达是具有强大生命力和灵活性，是由于它远胜于一般的、应用机械进行扫描的雷达，它的特点主要有如下几个方面。[2]

测多目标

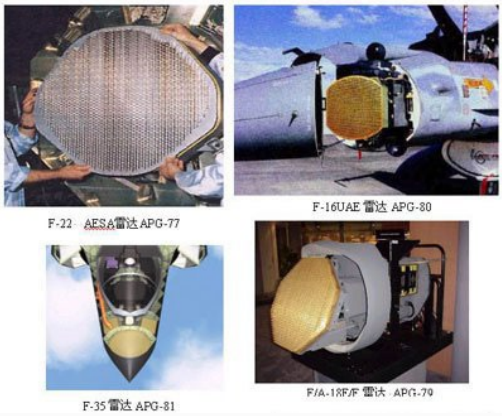
相控阵雷达是使用电子扫描的，它的波束指向具有灵活性，使得扫描可以快速进行，也可以实现多个目标的同时跟踪，并与计算机相互配合能对多个不同方向、不同高度的目标进行有效的发现、勘探以及进行跟踪，与此

同时能够引导多枚导弹对众多个空中的目标进行攻击。因此相控阵雷达多使用于目标众多、方向不同并且有不同层次的空袭中。[2]

机动能力

相控阵雷达是一部可以代替多部专用雷达工作的系统，它可以同时形成多个波束并且对其进行独立的控制。这些波束可以进行搜索、勘探、识别、跟踪、对目标进行照射以及对导弹进行制导等。正因为如此，它可以很大程度的对武器系统设备进行减少，从而提升了系统的机动能力。[2]

对抗干扰



机载有源相控阵--21 世纪机载雷达的革命

相控阵雷达具有非常高的功率并且能对能量进行合理地管理，并对主瓣增益进行控制根据方向的不同分配不同的能量并进行发射，这样做更有益于对自适应旁瓣的抑制。也有益于进行各种干扰自适应的抵抗，可以快速的发现远距离目标以及小型雷达反射面的目标，与此同时还可以对反辐射导弹的抵抗能力。[2]

相控阵雷达的发射系统由数十至上百块功率放大模块组成，通过相控阵天线采用集中式发射，集中向天线面阵馈电并通过移相控制波束方向，发射馈线损耗较大，同时放大模块故障率较高。相控阵发射机长时间工作后，经常出现个别功率放大模块和线缆老化情况，虽然不会使雷达整体停止工作，但辐射方向图和波束指向均会发生偏移，进而对雷达精度和探测范围产生影响，亟需低成本的有效、可靠方法实现发射机全部功率放大模块的有效实时监控，从而降低相控阵雷达检修维护的难度。[1]

服役动态

实际应用

相控阵雷达在现代战争中广泛地应用着电子定位技术，并且对其进行了深入的探索，在军事中，海空中进行远程的精准打击是很大的需求，这就要求定位技术的更深层次的应用。[2]

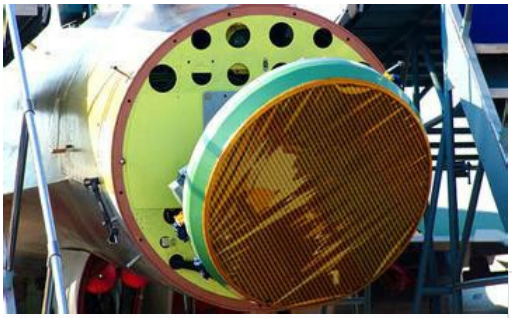
靶场测量：靶场是常见的对武器装备进行实验以及鉴定的场所，还可以对航天器进行实验、发射。靶场的测量是在试验的基础上，为应用服务的。[2]

1. 导弹靶场。导弹靶场分为两个部分，即上靶场和下靶场，上靶场也被称为发射区或者首区，下靶场也叫做再入区或者是落区、着弹区。导弹的上靶场是对导弹进行发射的场所。它的主要任务就是监视导弹的飞行轨道是否是预设轨道，是确认靶场安全的依据，并且对新型的导弹在飞行过程中出现的各种物理现象提供数据。导弹的下靶场，主要是对导弹目标的特性以及反导武器的系统进行测量和鉴定的场所。[2]

2. 航天靶场。战略导弹是航天运载火箭的基础，所以，早期的导弹靶场想在依旧是中孤傲的航天器发射点。[2]

3. 常规靶场。常规靶场可以分为常规兵器靶场以及电子靶场。其中常规兵器靶场一向是各个国家要进行大力发展的重点。它具有威力大，精度高，多种功能，效能好以及费用低廉的特点。[2]

发展趋势



苏 35 的雪豹 E 型机载雷达

多功能相控阵雷达的发展经历了无源、有源以及数字三个阶段。无源相控阵雷达配置了中央功率产生器,可以通过雷达内的无源网络对发射功率进行调整,如使用透镜系统或波导网络对阵元的信号发射功率进行分配等。相较于传统的机械雷达,其最大的特点是为每一阵元分配了独立的移相器。有源相控阵雷达则是为每一阵元配置了一组完整的组件,利用该组件完成中央功率产生器的相关功能,且其功能更完善如相位与增益可调,集成度与灵敏度更高。数字相控阵雷达则将进一步提升了固态集成电路的占比,将数字波束形成技术应用到相控阵雷达中来提升雷达的扫描频率、扫描范围以及抗干扰性。[7]

中国公开新型相控阵雷达

由于多功能相控阵雷达技术先进、制造成本高昂，除了军事用途之外，还可以作为气象雷达和空中交通管制雷达。其发展趋势是，在技术性能方面朝着薄型轻型封装、宽的全带宽和瞬时带宽、多任务功能、动态软件（认

知) 模式、模块化开放系统结构(MOSA) 、多领域可兼容性工作方向发展; 在战术性能方面朝着多功能、自适应、网络化、可互操作性方向发展; 在服务保障方面朝着高可靠性、可维护性，迅速更换模块方向发展。[6]

封装: 薄型、轻型、共形天线，较少元器件、外场可更换单元、外场可更换模块。[6]

带宽: 不断加宽的全带宽和瞬时带宽。[6]

更多任务功能: 雷达、通信、电子战、情报、监视、侦察、无源传感。[6]

动态软件(认知) 模式: 自适应模式应对电磁和目标环境。通过感知、分析外部目标和环境的特性，来改变系统工作模式及发射信号波形，优化配置系统资源，实现雷达系统的“在线闭环探测”，充分利用先验信息，使系统整体性能最优。[6]

MOSA: 模块开放式系统结构可选用最佳的模块来构建系统。[6]

交叉领域工作: 在系统与系统中的模式、通信和处理可兼容。[6]

性能: 多功能/多任务、适应任务需求、内置硬件/软件的增多、在各级上可扩展性能、网络准备、网络中心、可互操作性。[6]

服务保障: 可靠性与可维护性、系统的通用性、世界范围内的补给站与后勤保障、相同的维修手册、迅速而简易的外场可更换模块的换取。[6]

安全性能

大型相控阵雷达是战略预警系统中的重要组成部分，担负着守卫国家空天安全的重大使命。安全性是武器装备的一种固有属性，安全性设计是保证装备满足规定的安全性要求最关键和最有效的措施，包括消除和降低危险的设计，在设计中采用安全和告警装置等活动，通过安全性设计，提高产品安全性，确保安全性是武器装备研制、生产、使用和保障的首要要求。[8]

- **电气安全性**

大型相控阵雷达装备结构复杂，电子设备在其中所占的比例很高，是安全性设计的重要环节，雷达装备电气安全性设计涉及到的主要有电源安全性保护设计、电气设备安全性保护设计，以及接地、搭接和屏蔽的安全性保护设计等。大型相控阵雷达电气安全性的特点主要是保护范围大和需要保护元器件多。需要针对以下几个方面对电气安全性进行防护：雷达电源系统安全性、雷达天线阵面防电击安全性、雷达机柜防过电压过电流安全性、雷达接收系统接地安全性。[8]

- **结构安全性**

大型相控阵雷达结构安全性设计的目的是从大型相控阵雷达结构设计的角度出发，使雷达装备在整个寿命期内，在正常使用、维修、运输以及各种工作环境甚至故障条件下，防止人员受到伤害或设备造成损失。对于大型相控阵雷达结构安全性设计，可以从雷达冷却系统结构安全性设计、雷达机械结构安全性设计和雷达天线阵面安全性设计这 3 个方面去考虑。[8]

- **人机安全性**

大型相控阵雷达装备是由人进行操作，人本身就是一个复杂的模型， 易受操作环境、 工作强度的影响，还和自身的能力、情绪、经验等很多因素有关。因此，在进行人机安全性设计时，要降低复杂度，降低不可预料因素造成的影响，降低装备本身对人员造成的影响，使人员在安全的前提下操作使用装备，大型相控阵雷达的人机安全性设计可以从以下几个方面来考虑：防触电安全性、温度环境安全性、噪声环境安全性、辐射环境安全性。[8]

各国装备

- **以色列**

“铁穹”系统是以色列为应对长期以来所受火箭弹等威胁研制的近程防空系统。“专门订制”，使它投入实战部署的当年便成功拦截了一枚苏制“冰雹”122 毫米火箭弹。此后，以军对该系统不断升级，使它承担起末端对空防御任务。

该系统一般由 1 部多功能相控阵雷达、1 套战场管理及武器控制系统、3 到 6 部 20 联装发射装置组成。多功能相控阵雷达是该系统的“眼睛”和“耳朵”。这是一种炮兵弹道侦察/防空雷达，对火炮弹丸、飞机和导弹的探测距离较远，能在数秒内完成对目标的搜索、识别、跟踪，快速定位发射地点，提供精确目标轨迹，并将信息传送给战场管理及武器控制系统。[10]

- **中国**

2016 年的珠海航展上，14 所就曾首度对外展示 KLJ-7A 国产机载有源相控阵火控雷达，成为航展知名装备。[9]

总体评价

相控阵雷达与传统机械雷达依靠天线物理上的机械转动进行扫描不同，该雷达可以发射出很多的波束，边扫描边跟踪，故而具有了许多机械雷达无可比拟的优越性。

——目标容量大。相控阵雷达电扫描灵活性、快速性等特点可以让其眼观八方，同时捕捉到多批目标，敌方在其火眼金睛下很难遁形，可控制多枚导弹对多个目标进行打击。

——功能多、机动性强。相控阵雷达能同时形成多个独立控制的波束，分别完成搜索、探测和制导导弹等功能，一部雷达就能完成多部专用机械雷达的工作，大大提升了系统的机动能力。

——指向灵活、数据率高。相控阵雷达天线无需做指针式圆周转动，摆脱了传统意义的天线扫描方式。电扫描使其波束指向灵活，大大缩短了对目标信号检测、录取、信息传递等所需的时间，因此具有更高的数据率。

——抗干扰能力强。相控阵雷达辐射单元多，发射功率高，能够合理地管理能量，根据方向的不同分配不同的能量并进行发射，易于对抗各种干扰。

——可靠性高。雷达的阵列组较多，且并联使用，即使有少量组件失效，仍能正常工作。

相控阵雷达也有一些缺点。一方面，相控阵雷达造价昂贵，典型的相控阵雷达造价是普通雷达的 10 倍左右；另一方面，相控阵雷达波束扫描范围有限。其最大的扫描角度为 90~120 度，如果要做到 360 度全范围扫描，需要几个相控阵雷达才能实现。[11]