

相控阵天线

上 集

《国外电子技术》一九七四年增刊(2)

| | |
|------------------------|-------|
| 弹道导弹防御对相控阵雷达的要求 | (1) |
| 地面相控阵天线概况 | (2) |
| 舰用相控阵天线的成就及要求 | (6) |
| 相控阵天线在宇宙飞船上的应用 | (10) |
| 机载相控阵天线述评 | (20) |
| 航天用相控阵雷达 | (25) |
| 固体相控阵的设计、性能和造价考虑 | (30) |
| 相控阵单元型式的比较 | (36) |
| 相控阵天线的分析方法 | (48) |
| 子阵天线的无限阵列 | (59) |
| 用广义散射矩阵法分析无限大的矩形波导平面阵列 | (65) |
| 相控阵天线中的表面波效应与盲点 | (76) |
| 介质覆盖相控阵的边缘效应 | (80) |
| 关于取消稀布阵列中无源单元的影响 | (85) |
| 小阵列分析及其对阵列单元设计的应用 | (90) |
| 设计相控阵天线辐射单元的模拟器技术综述 | (93) |
| 设计相控阵天线波导单元的一种新方法 | (106) |
| 相控阵天线的宽角阻抗匹配——理论和实际综述 | (111) |
| 宽频带宽扫描角波导辐射单元的设计 | (122) |
| 宽角扫描阻抗匹配用的多模相控阵单元 | (126) |
| 一种适用于相控阵的新型嵌装天线单元 | (132) |
| 防止在雨中性能降低的相控阵辐射阵面的设计 | (137) |
| 编者的话 | (封二) |
| 附 录 | (封三) |

国外电子技术编辑部

编 者 的 话

本专题资料基本上是对美国1972年出版的1970年相控阵天线会议录《Phased Array Antennas—Proceedings of the 1970 Phased Array Antenna Symposium》的全文翻译，将分上、下两集出版。

美国的这种专业讨论会曾于1964年举办过一次。1970年的这一会议，他们宣称是在该领域中取得重大进展后，由美国陆军先进弹道导弹防御局、麻省理工学院林肯实验室和麻省理工学院共同主持召开的。从其全属军事应用的内容来看，显然是美帝国主义出于与苏联等帝国主义争霸世界的“全球战略”需要的一个结果。这是应该予以揭露的。

收录于这一会议文集的资料，几乎涉及相控阵天线所有方面的问题：从阵列单元理论的阐述、某些技术难点的理论解释和新型阵列单元的提出，到设计、制造及测量方法的具体介绍；从对不同应用要求的综述到对平面阵与非平面阵的比较；从馈源网络的设计到波束控向的实现，等等，都给出了较为系统、深入的分析；对移相器技术、固体技术对阵列设计的影响也作了相应的讨论。初版原序还称，之所以在1972年把它们汇集起来出版，是因为该技术领域在此后几乎没有多大新进展。这些是否都合乎实际和有参考价值，是应由对此感兴趣的读者加以分析和鉴别的。这是我们把它介绍给读者的一个原因。

相控阵天线这一自五十年代以来受到有关国家重视和竞相研制的技术，至今仍是当今天线研究领域中之甚为活跃的一个课题。它的主要应用是基于由它实现的雷达能同时探测和跟踪空中的众多目标；两个超级大国在反导系统中的这种应用，是众所周知的事例。国外对在舰载、机载和卫星通信系统、甚至在航天、电子对抗和核武器控制系统中应用的报导，近年来也日益增多。但由于相控阵天线的目前造价与技术难度，比其他雷达天线相比通常要高得多，而且还有不少有待不断实践才能进一步完善工程设计的技术难题；因此，如何根据既定的战术技术指标，从综合平衡可靠性、先进性、合理性和经济性出发，作出适合我国具体情况的最佳抉择，是我国雷达与天线研究人员共同面临的一个问题。遵循洋为中用的既定方针，把国外的某些具体经验作为调查研究的一个对象，去粗取精，去伪存真，由此及彼，由表及里，从而有所借鉴，也是我们编译出版这两集增刊的另一出发点。

上集的译、校工作是由成都电讯工程学院及北京七五〇信箱的有关同志完成的。成电的谢处方同志还对全部初样作了复校，并初步统一订定了在该集中出现的有关术语的译名。下集基本上是由南京313信箱有关同志完成译、校任务的。我们趁此上集出版之时，谨向热情支持这一工作的成都电讯工程学院和南京313信箱的领导同志及所有积极参加译校与帮助出版此增刊的同志们表示深切的谢意。但由于我们的水平、能力有限，无论是文字译校或编辑加工都会有欠妥、错漏之处，对下集中某些术语的译名也未进一步加以统一，这些都希望读者给以批评指正，使我们今后的工作有可能做得更好一些。

弹道导弹防御对相控阵雷达的要求*

R. S. McCarthy

引言

建议相控阵雷达用于弹道导弹防御已近十年。据认为它具有多功能、快速被束控制及坚固等优点。现已设计出若干采用相控阵雷达的弹道导弹防御系统并已制成几个系统。本文旨在讨论决定对这种用途的相控阵雷达所要求的一些考虑。

影响这些要求的因素很多，作为解决弹道导弹防御问题的一个组成部分，相控阵雷达必须满足这些要求。可惜，由于缺乏分类，本文不可能详细介绍这些要求。然而，研究一下弹道导弹防御系统的总体要求，并说明如何把这些要求转换成对雷达的要求，也是有益的。

影响弹道导弹防御系统要求的因素有以下六点：

一、防区特征；二、要达到的设防任务；三、威胁物（即导弹）的特征；四、待考虑的系统组态；五、预料的作战环境；六、安装好的系统各个组成部分的可用性。所有这些系统要求都多少会影响对雷达的要求，其中有些影响还比较严重。例如，威胁物的特征是选择雷达参数的重要因素。另一方面，设防任务对所需系统布署情况影响很大，而对雷达要求的影响就很微妙。

讨论

防区特征

对雷达要求具有极大影响的防区特征包括：1. 防御范围，2. 相对价值，3. 坚固程度，4. 地形。

设防任务

当遭到导弹威胁袭击时，防御设施通常不是为了防止防御体系被摧毁，就是为了保证人员和洲际弹道导弹武器具有顽存能力。

导弹威胁的特征

导弹威胁特性通常是确定防御体系性质及对雷达要求的最重要因素。在威胁特性中最重要的是：攻击方向、雷达横截面、目标数量、性能与爆炸时间的函

数关系、每次拦截导弹飞行时间内所要拦截的弹头数和突防辅助手段。

系统组态

显而易见，区域防御系统所配置的雷达同防御“民兵”导弹地下发射井所设计的雷达迥然不同，甚至在能有效地任选一种防御形式（例如对“民兵”导弹的积极防御）情况下，对雷达的各项要求也很不相同。

作战环境

作战环境分为城市防御和导弹阵地防御两类。不论在城市防御还是“民兵”导弹防御方面，都希望防御设施比被防御阵地更不容易受到攻击，使防御设施成为不引人注意的目标。在城市防御中，这一要求比较容易满足；然而，在“民兵”导弹防御方面，这个要求就不大可能实现。当较大的核武器在设防区爆炸时，就会出现最困难的作战环境。当未能拦截住全部导弹时，当采用优先重点防御原则或恰好在拦截前攻击武器就爆炸时，都会出现在设防区爆炸的情况。

现有系统的各个组成部分

现有已布署的系统的各个组成部分也与新的系统要求互有影响：1. 由于确定生产能力、训练安装和操作人员及各自的行政管理工作等所需的费用和时间，有一股强大的趋势要求加强各系统的现有关系；2. 新系统大概要与现有系统的工作衔接起来。

结语：

对相控阵雷达的要求是根据下述因素推导出来的：对系统的上述各项考虑；选用的各该系统的解决办法；在确定相控阵天线诸参数、其它雷达诸参数及辅助武器系统（譬如数据处理装置和拦截武器）方面经济上的折衷考虑。弹道导弹防御体系中用的大多数相控阵雷达均能完成多种功能，通常都要能够进行分点瞄准（跟踪）和立体复盖（搜索），因此对天线的许多参数都得采取折衷方案。

* “BMD Requirements for Phased Array Radars”, pp.6~7(黄德建译, 汪育农、尚木校)。

地面相控阵天线概况

A. C. Schell

本文探讨了地面探测系统用相控阵天线的三个主要发展方向。代表这三个方向的具体实例是，AN/FPS-85、HAPDAR(硬点防御实验性相控阵雷达)和 AN/TPN-19 雷达的天线。将这三种雷达天线作为典型实例的意义并不在于单元数或各项雷达参数，而在于它们的设计方法及由此而产生的优点和缺点。所得到的天线结构均有性能的极限范围。在选择各种应用的设计方案时，应最佳地利用天线优点。

引言

相控阵技术在地面探测系统中的应用，已导出了几种能满足不同要求的天线形式。二十年前，贝尔电话实验室建造了方向可变的多元阵列天线(MUSA)系统，为短波接收提供了一种可调节的波束。二次世界大战后，曾对电控波束的各种概念作过研究。有几种机电方法(如：采用圆形转换器)取得进展，使波束能以中等高速进行扫描。得到发展的主要原因是出自对探测系统的一系列军事需要，即要求有比当时的设备具有大得多的搜索、跟踪能力的探测系统。

要求对弹道导弹进行有效防御曾是对相控阵技术提出来的最大任务。也是过去十年里绝大多数发展的推动力。弹道导弹防御问题所产生的压力和准则不断地推动着天线技术的发展。

但是，其它用途的相控阵天线也已成为重要的考虑课题。尽管目前在很多应用方面相控阵的价格比起它的用途来说是太高了，但是，随着以前较为简单的许多探测工作的复杂性与数据率的提高而必须引入先进技术设备，在这些方面相控阵就变得具有竞争性了。例如，空中交通管制雷达在过去很多年里只使用简单的机械控制天线。在这一期间，起飞和着陆的飞机数目，飞机的种类(从大型商业运输机到短距起飞的飞机和直升机)都大大增加。飞行速度有了提高，在恶劣天气里飞行也成了常事，所以对有效地测定并显示飞行信息的航空港设备的需要就显得更明确，更现实了。

促进相控阵发展的另一种需要是对太空目标的监视和跟踪。探测和监视目标的距离、飞行速率和数量要求设备的电性能与相控阵很好地相配合。

相控阵的工作与现有系统设计特别一致的一个方面是由计算机控制操作的固有本质。不仅相控阵波束要由计算机来控制，而且充分利用发射机功率的阵列性能也要由计算机来控制。在朝着给定方向的远距离

目标发射脉冲时，天线波束可被控制来复盖其他较近距离目标，然后再在适当的时间间隔内反过来接收远距离目标的反射脉冲。通过对雷达操作顺序的仔细安排，相控阵天线可比慢速机械控制天线更充分地利用脉冲周期，特别是在距离极远时更是如此。相控阵利用计算机来分配和控制天线复盖范围内的所有探测工作的能力，将使相控阵天线可以应用到采用电扫描方式的各种新设备中，从而提高了系统的性能。特殊用途的阵列天线可以提供独特的性能，这是系统的计算机与天线组合使用以后的必然产物。

在过去几年里已经设计并制造了很多不同类型的相控阵天线。根据对它们性能的侧重点的不同，存在着不同的分类方法。有一种是根据波束的控制形式来分类，可分为：时延控制、移相器扫描、频率扫描和幅度扫描。其他的分类方法有：平面——曲面，波导——波导管，模拟(连续的)——数字(阶跃的)，扫描——多波束，也可以根据极性、几何形状或配相原理来分类。为特殊用途选择某一种阵列通常表明从技术上对几种近似的设计方案各种优点的判决。在几种只有细微区别的选择方案中，价格就成为选择时考虑的主要因素。例如，若将功率放大器设于发射阵列移相器的前面，就要求移相器能承受大功率，而在移相之后进行放大，就需要使用许多发射元件。由于现代技术使部件的利用率和性能不断改进和提高，对于这些设计的选择就需不断地进行修正。相控阵的设计在很大程度上是设计者的经验、现代设计实践、有效的组合以及解决系统总体设计问题等因素的综合。因此，不能把设计的各个方面看成是一成不变的，目前这个课题正作为一门技术来进行研究。

每个相控阵都包含有大量发射单元，一个馈电网络，一套元件或一个工作程序，通过程序来控制波束

* "Survey of Ground Based Phased Array Antennas", pp.9~14. (李昕译, 汪育农、李玉文校)。

或者在预定的覆盖范围内产生一组波束。阵列的类型和操作方法主要取决于应用。本文试图从地面相控阵的设计角度出发在三个方面进行探讨。这三个方面代表了相控阵发展的三个阶段，但是每一阶段又有它自己的适用范围，而且毫无疑问它还将继续使用下去。

第一种设计是“布线”阵列，其馈电网络包括一组合理互连的波导或传输线。现在有一种改进方案，它采用大量模式发射机，用传输线相连方式进行相参射频激励和配相。这种类型的实例是 AN/FPS-85 宇宙空间跟踪雷达的阵列。

第二种设计是“光学”阵列，其馈电网络包括处于一个(或一组)喇叭与阵列面之间的自由空间通路。阵面上装有移相器，使孔径电磁场具有适当的相前，从而获得所需的波束方向。这种类型的天线可作为一种有源透镜或有源反射器。当阵面里的方波长数很大而波长很短时，倾向于使用这种阵列。这种方案的一个实例是 HAPDAR 阵列。这种相控阵有几种用途，并正用于现在的反弹道导弹系统的导弹阵地雷达。

第三种设计是相控阵技术与其他类型天线相结合的混合设计。对那些不需要宽角复盖范围而又不适合采用一般相控阵方法者，可以使用这种阵列。例如，AN/TPN-19 地面着陆控制系统的精密进场雷达就是采用相控阵与反射器相结合的方式，产生电扫描波束。对于特殊用途，相控阵技术可以通过用基本元件和新方式阵列来满足其要求。诸如复盖扇形区、带宽或波束数等这些系统极限可用来降低相控阵的复杂程度。这就要把相控阵设计与其他天线技术结合起来以达到预期的效果。在精密进场雷达所需的扇形复盖区有限的情况下，混合阵列里移相器和辐射器的数目可以大大少于普通平面阵列根据增益考虑所需的数目。

二、AN/FPS-85 宇宙空间跟踪雷达天线

AN/FPS-85 是一种大型超高频相控阵天线，用于探测、识别和跟踪宇宙目标。这部雷达是本迪克斯公司制造的，架设在佛罗里达州的埃格林空军基地，由美国空军防空司令部使用。雷达的操作是由计算机控制的。许多复杂的搜索和跟踪任务是由计算机依照防空司令部空间防御中心的计算机发送的定期更新的指令来完成的。

FPS-85 雷达的相控阵天线占据了雷达建筑群南面的倾斜阵面。发射阵列包括 5184 个带有引向器的梨形偶极天线，它们排列在 72×72 的方栅格上，单元的间距为 0.55λ 。在中心频率为 442 兆赫时，瞄准线上发射阵列的波束宽度为 1.4° 。每个单元都由发射机模块馈电，该模块转换已定相的超高频信号，并将其峰值功率放大到 10 瓦。发射阵列被均匀地照射，其

带宽为 10 兆赫。图 1 和图 2 是 AN/FPS-85 雷达的两张照片。

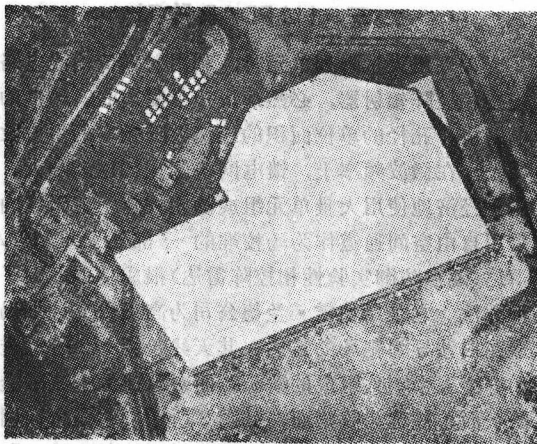


图 1 AN/FPS-85 雷达正视图，图中示出两个阵列

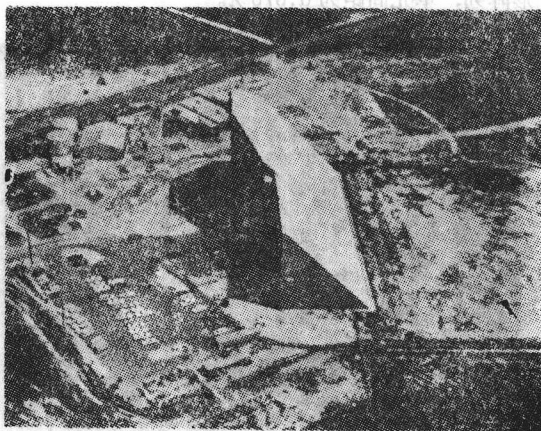


图 2 AN/FPS-85 侧视图

接收阵列有 19500 个交叉偶极天线，它们都排列在一个直径约为 190 呎的八边形中方栅格里。4680 个相同的接收机模块与构成间距渐疏形状的各个单元相连。端接无源单元。接收时波束形成网络产生由 9 条波束组成的聚束。中频带宽为 1 兆赫。

发射和接收阵列共用一个波束控制网络。工作在 100 兆赫的 7 位二极管移相器产生行和列的相位梯度，并随接收信号和低功率发射信号而变频。

AN/FPS-85 雷达配有大量自动测试和校验设备。通过一系列硬件检验和操纵测试对系统的工作情况不断地进行估计。还有监视仪表盘，例如发射机校准仪表盘，就可以随时显示超出容限的发射机模块。

这部雷达是平面“布线”相控阵雷达的一个非常成功的范例。目前正在运转，其性能超过了设计要求⁽¹⁾。

在尺寸和工作能力方面它成为地面相控阵雷达的典型。

三、HAPDAR 阵列

在采用大量阵列单元时，利用射频传输线电路来连接相控阵辐射器，必然形成一个复杂的、昂贵的馈电网络。孔径的单位面积的连接数随频率的平方数而增长，在微波频率上，馈电网络的损耗逐渐加大。为能更经济地使用大量单元组成的相控阵，在天线内可采用自由空间通道作为场校准的一部分。HAPDAR 雷达(硬点防御实验性相控阵雷达)很成功地证明了这种方法。它是斯伯雷·兰德公司为高级研究计划局建造在白沙导弹靶场的雷达。其天线包括一个有源透镜和一个五个喇叭组成的馈源。面对着馈源喇叭的透镜的一面，被称为收集面，如图 3 所示，它是个印刷偶极天线的三角形阵列。透镜面的直径为 41λ ，即透镜面至馈源喇叭的距离。外部或辐射面是喇叭的三角形阵列，单元间距为 0.676λ 。

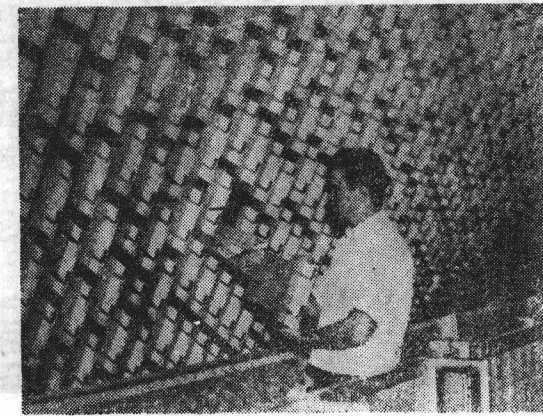


图 3 HAPDAR 雷达的收集面

透镜面之间装有印刷线路组合器和三位数字式二极管移相器，组合器将半数以上收集器对的输出端连在一起，移相器校准电磁场，使提供理想波束方向所必需的波前相位偏角。选用 2:1 的组合器配置，以便在馈电喇叭的 9 分贝边界渐疏度之外，再提供孔径的间距渐疏度。绝大部分余下的收集器单元通过移相器与辐射喇叭直接相连，另外一些则为终端连接。图 4 为有源透镜元件。辐射面单元中约有一半与收集面相连接，余下的是终端连接。图 5 为辐射面的结构。移相器的作用是把喇叭的球面波前变换成平面波前，并把需要的偏角引入波前。结果，使平面阵列产生的误差规律图形变为不会产生高栅瓣的随机相位函数。天线的功率增益为 35.9 分贝，包括因漏失、失配和其他原因所造成的 2.4 分贝损耗和 1.2 分贝的移相器损

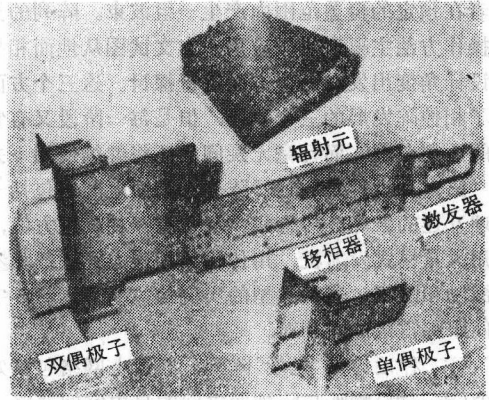


图 4 HAPDAR 雷达的有源透镜元件

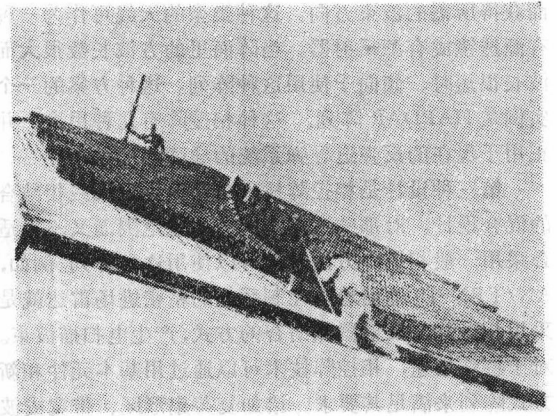


图 5 HAPDAR 雷达透镜的辐射面结构

耗。估算的峰值旁瓣电平为 28 分贝。喇叭馈源除提供和波办单脉冲外，并为方位角和俯仰角提供单脉冲。HAPDAR 阵列使所用雷达能够稳定和精确地工作。通过一系列测试使这一设计⁽²⁾得到确认。图 6 为整个天线外貌。

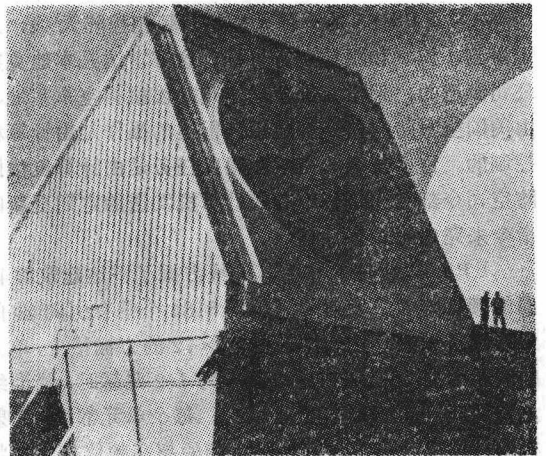


图 6 HAPDAR 雷达阵列

准光学馈源的设计原则可用于反射器和透镜配置。空间馈电反射阵列天线包括一个馈源喇叭和一个由许多单元组成的阵列，每个单元均与后面接有短路的移相器相连接。喇叭照射阵列，每个反射信号的相位都由移相器来调整，以便产生理想的方向图^[3]。

特别由于廉价的模式阵列单元和移相器的工艺发展，使准光学馈源设计技术在雷达上的应用越来越广泛。空间馈电阵列的一个突出的实例就是目前的反弹道导弹系统的导弹阵地雷达的天线。这部雷达采用了与 HAPDAR 阵列相类似的空间馈电透镜天线^[4]。

四、AN/TPN-19 精密进场雷达

前面几节所讨论的天线均可复盖一个广角扇形区，但是并非所有的情况都需要极宽的广角覆盖范围，这一点可在天线的设计中反映出来。根据系统的应用所要求的准则作适当的协调，天线设计可以提高性能、降低成本和复杂性。例如，美国空军的一种新型战术地面着陆控制系统的精密进场雷达规定的扫描区覆盖范围为 $14^\circ \times 20^\circ$ 。然而，考虑到 X-波段天线的增益，就需要采用约 3000 个辐射单元的普通平面波导相控阵天线。为了大大减少阵列单元的数目，雷声公司研制了一种供 AN/TPN-19 精密进场雷达用的反射体——阵列组合。这种设计方法的基本设想是采用一个有源付反射器，它用一个模拟移动式馈源的反射阵列来代替通常反射器天线的付反射器^[5]。这种方法又改进成用空间馈电透镜来代替反射阵列。阵列透镜包括 824 个排列在沿圆柱表面的交差行上的元件。多模式馈源喇叭以线性极化照射透镜的背面，其正面对约 9×12 吋² 的双曲面反射体辐射圆极化电磁场。阵列照射在反射器的某一区域内，并在所需方向产生一条波束。反射器和阵列的几何形状应选成：在波束被控制到远离瞄准线的地方时，使性能恶化减到最小程度。这种天线的作用在接收时也可以从几何光学的角度来看。从一定方向照射反射器的射线反射到聚焦区。相控阵安装在可以接收到这些射线，并能以适当的相位把所接收的电磁场结合起来的地方。

设计这种天线时，需要对反射器和阵列的尺寸、单元数和性能范围采取一个折衷方案。看来，基本极限就是：在满辐射图控制时所需的最少单元数，将根据作用范围立体角除以天线立体角波束宽度来确定。实际上，使用的单元数目还要多些。图 7 为 AN/TPN-19 精密进场雷达的试验型天线的照片。

在有限区域范围内工作的天线的设计是一个可以发挥混合天线技术优点的领域。混合设计包括两种以上的天线技术来获得所需的效果。组合并非一定要有一个反射器；也可以用相控阵加上一个透镜或第二阵

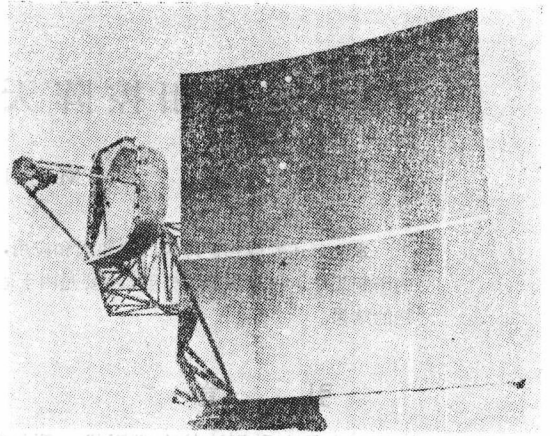


图 7 AN/TPN-19 精密进场雷达天线

列来对有限区域进行波束电扫描。AN/TPN-19 精密进场雷达主要考虑的是系统的重量，但是，在波束宽度、扫描率或序列。作用范围或安置方面可能受限制的其它系统中可考虑使用混合阵列。

五、结 语

相控阵天线已用于某些现役的地面探测系统中，也计划用于正在研制和准备使用的其它系统中。每一相控阵天线的设计由于使用要求，技术水平以及设计者解决问题的方法不同而互有区别。在设计大型极高功率的超高频阵列 FPS-85 时，设计者选用平面“布线”阵列，并采用了模式发射机和接收机。在设计低造价、高频率的 HAPDAR 雷达时，设计者为有源透镜选用了“光学”方式。在设计扫描范围有限的 TPN-19X 波段进场雷达时，设计者采用了由一个有源透镜和一个反射器组成的“混合”阵列。每一设计方案都根据应用范围、工作频率、覆盖范围、带宽和操作程序而定。由于相控阵技术的应用日益广泛，专门化设计也将增多，将来在地面天线波束电扫方面还会出现更多的设计方案。

参 考 资 料

- [1] J. E. Reed, "The AN/FPS-85 Radar System," Proc. IEEE, 57, I, pp. 324~335, March 1969.
- [2] P. J. Kahrilas, "HAPDAR-An Operational Phased Array Radar", Proc. IEEE, 56, II pp. 1067~1075, Nov. 1968.
- [3] D. G. Berry et al., "The Reflectarray Antenna," IEEE Trans. Ant & Prop., AP-11, pp. 645~652, Nov. 1963.
- [4] C. M. Johnson, "Ballistic-Missile Defense Radars," IEEE Spectrum, 7, 3, pp. 32~41, March 1970.
- [5] C. F. Winter, "Phase Scanning Experiments with Two-Reflector Antenna Systems," Proc. IEEE, 56, II, pp. 1984~1990, Nov. 1968.

舰用相控阵天线的成就及要求*

Merrill I. Skolnik

本文评述舰载相控阵天线的要求和应用,并列举海军实用相控阵的成就,还简要地提到实验室的研制工作。过去取得的成就,主要是由于适宜地采用了单座标波束定位频扫或者结合双座标系相扫的结果。

引言

现代军舰装有大量各种用途的电磁天线,例如雷达警戒、雷达武控、导航、空中交通管制、通信、敌我识别、测向及电子战等天线。对于需要发射和接收电磁波能量的定向天线波束的各种系统,都必定要考虑相控阵天线作为可能选用的天线。海军是首先在实战系统中采用电扫描相控阵天线的军种,而且是长期唯一使用相控阵天线的军种。早在十多年前,海军已把电扫描作为高数据率的三座标舰载对空搜索雷达的重要组成部分装备舰队。

相控阵可用于任何一种舰艇。但业已普遍考虑采用相控阵的舰艇主要有两种,即导弹驱逐舰及航空母舰。这两种舰只又以核动力舰只比较小型舰只居多。在核动力舰上,安置天线一般比有烟囱的非核动力舰只更方便。对于导弹驱逐舰及航空母舰来说,正是相控阵在雷达中的应用受到极大的重视。导弹驱逐舰上的雷达,必须在雷达作用距离内对所有高度上的空中目标提供远距离警戒和跟踪。此外,还须装有敌我识别雷达,并对防御导弹提供制导信息。航空母舰上相控阵除了要完成和导弹驱逐舰上相控阵同样功能以外,通常还需要具有对舰载飞机进行管制和引导着陆的功能。

本文旨在评论相控阵在军舰上过去和现在的应用。也评论了海军实验室在这个技术领域中进行的研究和发展工作,海军的主要研究成果是相控阵在雷达中的应用。因此,本文将集中大量篇幅叙述这一重要应用。

相控阵的理论基础

和其它天线技术相比,相控阵具有两个特点:能发射大功率,能灵活地进行波束定位。在舰艇上很少利用相控阵发射特别大功率的能力。普通舰载远程雷达系统已经或能够使用的发射机平均功率与相控阵雷达已经使用或建议的发射机平均功率并无多大差别。尽管现代化的舰艇上可以有很大的原动力,但分配到

雷达上的总功率是有限的。此外,在占地面积和重量方面的限制,也不希望雷达有非常大的发射功率,因为这需牺牲其它要求。另一个降低大功率的理由是现代海军雷达发射机的功率可能已足以胜任工作。因此,对于海军雷达的大多数应用来说,一般不需要相控阵发射巨大功率,否则,舰艇上协调工作也是困难的。

尽管大功率的潜在优点并不十分引人注目,但是相控阵天线能够产生迅速定位的波束的本领或许是有关舰用雷达相控阵天线的主要特点,产生这种波束是为了以高数据率进行多目标近距同时跟踪以及武控雷达系统中进行警戒。波束灵活性带来的另一优点就是,许多船用雷达所要求的天线波束稳定性可以用相控阵波束电子控制来实现,而不是像普通雷达那样要用大量的机械传动。

有时,舰载相控阵据称还具有另外三个优点:孔径分布控制比反射器天线好,可以安装在舰只的较低部分以便减小上部的重量和动量;外部形状比其它天线形状抗风力更强。这些优点均可在特定用途中利用,但优点本身一般不是选择相控阵的主要理由。通过更好地控制孔径来抑制旁瓣是不值得做的,因为舰载雷达的旁瓣往往主要由周围结构决定,而不是由孔径照射决定;如果天线阵设置在舰只的较低部位会降低其低空复盖那就是有害的;天线抗疾风或者其它敌对破坏的能力不必优于舰艇系统其它要害部分。

因此,主要由于相控阵独特的波束捷变特性,使其在舰艇应用中值得考虑。

除其优点外,相控阵也带来了一些缺陷。其造价及复杂性通常大大高于其它类型的天线,天线阵控制系统的软设备生产费钱和费时。这些缺陷未必是无关紧要的,因而也是相控阵天线不能更大量地应用的原因。

* "Survey of Phased Array Accomplishments and Requirements for Navy Ships", pp. 15~20(李良玉译,尚木校)。

舰载雷达的相控阵

最早把相控阵技术应用于实用雷达的例子之一是 FH MUSA 或者 MK8, 即 42 单元 S 波段介质棒辐射器天线阵(见图 1)⁽¹⁾。42 单元分三排, 每排 14 个辐射器, 由于将 3 个垂直单元连在一起, 因此天线基本上是 14 单元的线性阵列。移相器为机械激励的 FOX 旋转波导型⁽²⁾, 以便以每秒 10 的速率扫描 $\pm 9^\circ$ 。在这种扫描率下, 雷达提供几乎连续的类似地图的显示, 并且在主力舰上用作主炮的火力控制。MK8 原先能够满足的要求随着装备重炮的主力舰的退役而消失。尽管 MK8 采用机械移相器, 而不是采用成为今天天线阵技术心脏的电子移相器, 但因为它是相控阵首次实际应用, 并从中看出其广泛的用途, 所以还是把它包括在本篇关于海军相控阵研究工作的评论中。

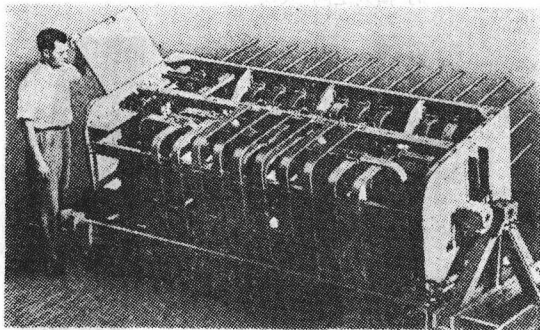


图 1 FH MUSA 采用机械移相器的介质棒相控阵雷达, 在主力舰上用来作为主炮火力控制

随着对飞机目标三座标(距离、方位及仰角)的探测和高数据率跟踪要求的增加, 海军为了用一副天线获得三维座标能力, 采用了电扫描方法。既然频率扫描是电子波束控制最简单、可靠而且较便宜的形式之一, 它就很可能是在实用雷达中应用的第一种电子方法。在导弹驱逐舰上用于指示和控制飞机的 AN/SPS-39、48 及 52 型雷达就是采用这种电扫描方法的。这些雷达在仰角上采用频率扫描迅速地对笔形波束定位, 在方位上通过机械旋转来扫描。这样的雷达用于载有黄铜骑士、小猎犬及艇艏人导弹的防空导弹舰上。

AN/SPS-39(及有关的 AN/SPS-42) 采用抛物面圆柱状反射器天线。馈源是有一条频敏螺旋状延迟线的 40 单元线性阵列(见图 2)。笔形波束辐射图可扫到 100 度角以上, 而频偏小于 10%。垂直扫描周期为毫秒级。功率输出同频率不呈线性关系, 但为了使功率随着相应于较低波束角的频率而增加从而达到远的作用距离, 功率输出是经过深思熟虑设计出来的。为在较低角度下对较远作用距离进行补偿, 脉冲重复频

率随仰角而变化, 脉冲重复频率的变化大约为 5:1。利用电子波束控制的灵活性, 无须用装在甲板上笨重的机械陀螺稳定设备就能稳定天线。舰艇主陀螺的摇摆和颠簸信号送到一台计算机, 该计算机便自动修改仰角射束扫描程序及在雷达显示器上示出目标的真实位置。在甲板上的设备重约 2800 磅。休斯飞机公司制造的第一台样机于 1957 年 8 月交付海军使用。此后, 大约有 100 多部这样的雷达装在美国及其它国家的舰艇上使用。

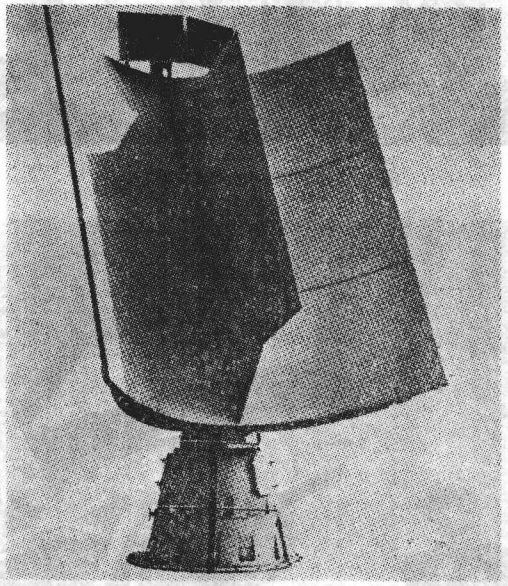


图 2 AN/SPS-39 频率扫描天线

AN/SPS-39 将被两种其它雷达所取代。AN/SPS-48^(3,4)(图 3)将用于大型舰只。AN/SPS-52(图 4)将用于小型舰只。这两种雷达均采用平面天线阵。其仰角采用频率扫描, 方位为机械旋转扫描。第一部舰用样机 AN/SPS-48 系由国际电话电报公司研制的, 已于 1962 年 7 月送交海军鉴定。它是为了向海军舰艇导弹武器控制系统以及飞机拦击控制系统提供必要的目标数据而设计的。这种雷达通过发射多波束来获得远作用距离及高数据率, 并采用了灵便的功率管理办法。天线重 4500 磅, 由螺旋形延迟线馈电。

休斯飞机公司制造的 AN/SPS-52 型雷达采用了平面天线阵。该天线所产生的笔形窄波束通过频率变化作阶跃式俯仰。天线及底座重 3240 磅。数字计算机代替了过去控制雷达波束的模拟计算机。1966 年 2 月交付了第一个天线系统。这种雷达已在美国及其它一些国家的舰艇上使用。

首先采用“横列定向”相控阵的是“企业号”核动力航空母舰及“长滩”号核动力巡洋舰上的 AN/SPS-32

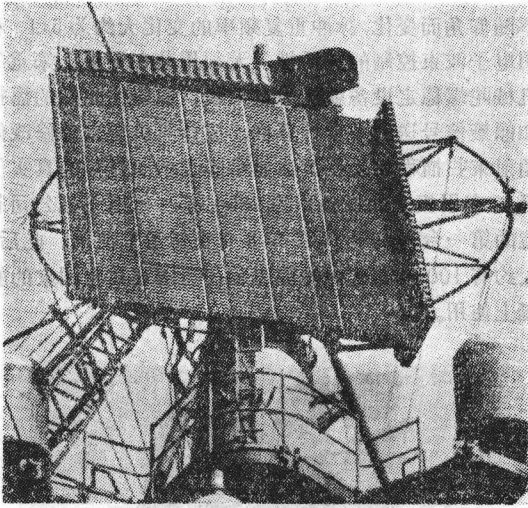


图3 AN/SPS-48 频率扫描天线

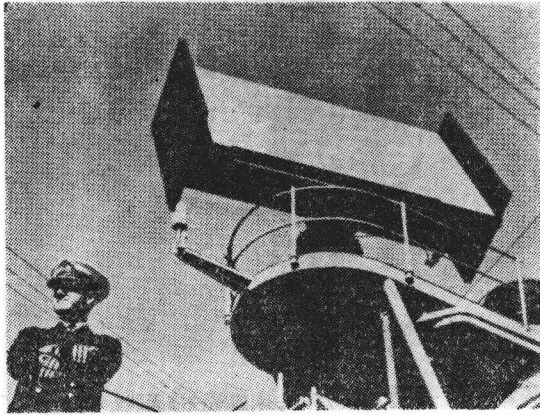


图4 装于澳大利亚舰艇上的 AN/SPS-52 频率扫描天线

及 AN/SPS-33 型雷达(见图 5)。平面天线成对地安装在舰只上层的方形结构的四边,并提供 360° 方位复盖范围和几乎到天顶角的仰角复盖范围。图 6 是两个天线更近的照片。左边天线用于 AN/SPS-32 雷达,它发射出方位为频率扫描的扇形波束来监视几百哩外的目标。右侧天线用于 AN/SPS-33 雷达。其笔形波束采用频率扫描控制其俯仰,但方位采用电子移相器控制波束。由计算机控制的 AN/SPS-33 可以自动跟踪几百个目标。

1956 年休斯公司开始研制 AN/SPS-32 型,1958 年研制 AN/SPS-33 型。这两种雷达都受到使用部队的好评。目前,“长滩”号上的雷达正在改进,使之更现代化。

AN/SPS-33 在设想和研制期间曾是一次大胆的尝试。选择了在三座标雷达中把频率扫描及相位扫描结合起来的方案,因为这样比之在两个平面内相位扫

描更为经济和实用。可以这样说:频率扫描本身已证明在实用雷达系统中是一种成功的电子扫描方法。

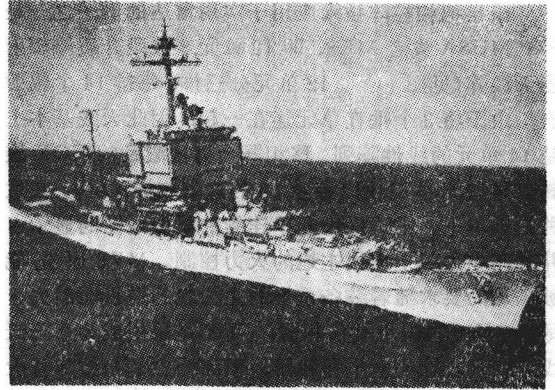


图5 安装在“长滩”号核动力导弹巡洋舰上层结构的 AN/SPS-32 及 AN/SPS-33 雷达的“横列定向”天线

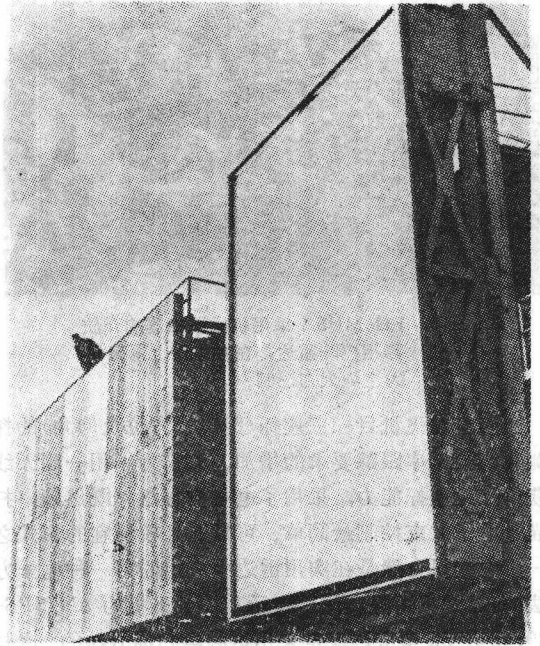


图6 建造中的 AN/SPS-32 天线(左)及 AN/SPS-33 天线(右)

50 年代后期,海军开始研制一种先进的三座标雷达 AN/SPG-59,或称为“台风”(Typhon)雷达。这部计算机控制的雷达设想能完成警戒、跟踪及导弹制导功能。然而 Typhon 研制计划由于要达到完全可靠雷达就太大、太复杂而被取消了。很大程度上这种复杂性是由于试图在一个频率上从一个孔径中完成几个主要雷达功能所致。

海军现在为新的导弹舰从事研制海盾(Aegis)(过去一度叫 ASMS)舰对空导弹防御系统,计划在 70 年

代中期编入舰队。该系统使用由四个分开的阵面组成的电子扫描相控阵雷达(称做 MFAR),其形状如示意图 7 所示。MFAR 能探测和跟踪远距离上的多个目标并对拦截导弹发射制导指令。这种雷达正由美国无线电公司着手研制。

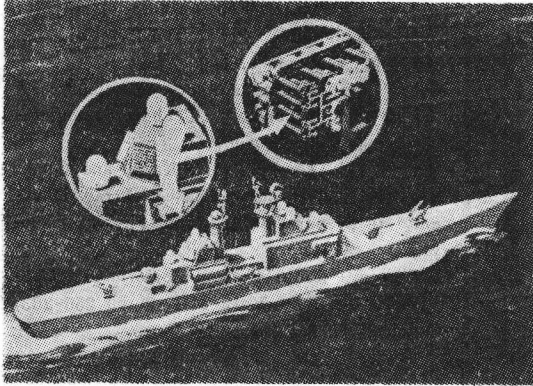


图 7 控制舰对空导弹系统的相控阵雷达系统示意图

海军其它的相控阵应用

尽管主要是研究相控阵天线在雷达上的应用,但它应用于舰用敌我识别、电子战系统以及包括卫星通讯在内的微波通讯中也感兴趣。同时也设想借助一个多功能相控阵天线孔径把几个电子系统合并起来完成通常由几个分离天线系统获得的功能。

海军实验室的相控阵研制计划

海军实验室对相控阵所进行的研制工作量与其它兵种相比是不算大的,但它的成绩是不小的。海军电子实验室(NELC)和海军研究实验室(NRL)对圆形对称天线阵^(6,8)的研制工作已获得重要成就。圆对称天线阵提供在方位上方向图的对称性及天线安装在船的桅杆上的可能性。

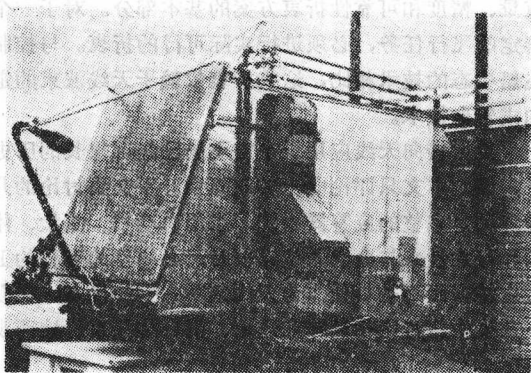


图 8 海军研究实验室的 2000 单元 S 波段反射天线阵雷达

图 8 为 2000 单元 S 波段反射天线阵雷达,海军研究实验室把它用作实验雷达,以供研究与海军舰用相控阵适用性有关的问题。海军研究实验室也从事于探索固体技术在相控阵上的应用问题。海军研究实验室和海军电子研究所都在从事研究包括能够辐射一个以上频率的阵列的新型相控阵技术。

尽管约翰霍普金斯大学应用物理实验室是非官方的,但很大程度上受海军支持,并且对相控阵做出了杰出的先驱研究。其中包括宽带阵列、子阵列以及元件技术^(7,8)。

系统应用的考虑

海军过去成功地使用了电子扫描是由于单座标光束控制的频率扫描及双座标控制的相位-频率扫描比较简单的缘故。相位扫描是频率扫描强有力的竞争者,并将在优于频率扫描之处应用。海军中最引人注目的电子光束控制的雷达应用是那些需要高数据率三座标目标信息的地方。然而远程警戒常用较普通雷达方法便可达到良好结果。

相控阵的灵便性引起人们考虑它作多功能雷达用。对于综合电子系统建议把各功能而不是雷达包括进去。一般来说,当考虑相控阵用于多功能雷达时,必须进行限制。比如考虑需要探测和跟踪飞机的地方如导弹防空系统中的应用。通常用两个分离雷达来完成探测和跟踪功能。普通的飞机警戒雷达,一般以较低的微波频率工作,设有大型天线,用低数据率搜一个大的空域,但又必须能够处理大量真目标和假目标。飞机跟踪雷达一般以较高的微波频率工作,设有小型天线,它能获得相对很少的目标的精确位置信息,每部雷达限制在某个空域以高数据率工作。警戒和跟踪时不同的雷达方程式⁽⁹⁾提供了这些差别的理论根据,自雷达发展的早期阶段以来就一直沿用这些差别。这就是警戒雷达看起来与跟踪雷达不同的道理。当需要用单一频率工作的单个相控阵雷达完成警戒和跟踪功能时,必须在警戒和跟踪要求中间采取折衷办法。这样的折衷办法可能引起造价比两种功能由两部单独的雷达来完成更高。

讨 论

海军已运用相控阵来完成一些专门的功能,如雷达的快速而灵便的波束控制。尽管与较通常的系统相比造价要高,但仍然采用相控阵。当试图利用一项新技术时,可能不惜成本。但随着认识提高,技术成熟,当相控阵应用在实际系统中时,就必须具有竞争力。当部署具体系统时,成本有效性是首位的,因此一般都采取保守方法。另一方面,可以期望相控阵的研究

和发展费用采取不同标准。在研究和发展中,想像和胆量应当作为驱动力,最重要的限制应是大自然提供的限制。

考虑到海军用在这项研究发展的资金较少,所以海军在应用相控阵方面的成就具有重要的意义。希望海军能继续在电子技术这一重要领域中的进展作出重大的贡献。

参 考 资 料

- [1] G. G Harvey, ed., "Report of Conference on Rapid Scanning," MIT Radiation Laboratory Report 54-27, June 15, 1943.
- [2] A. G. Fox, "An Adjustable Waveguide Phase Changer," Proc. IRE, Vol. 35, pp 1489-1498, December, 1947.
- [3] W. J. Evanzia, "Faster, Lighter 3-D Radar in Sight for Tactical Warfare," Electronics, Vol.

- 39, pp 80-88, June 27, 1966.
- [4] D. C. Bailey, "AN/SPS-48 Radar development," NAVSHIPS Technical News, pp 16-18, September, 1966.
- [5] J. H. Provencher, "A Survey of Circular Symmetric Arrays," Polytechnic Institute of Brooklyn Phased-Array Antenna Symposium, 1970.
- [6] B. Sheleg, "A Matrix-Fed Circular Array for Continuous Scanning," Proc. IEEE, Vol. 56, pp 2016-2027, November, 1968.
- [7] J. Frank, "Phased Array Antenna Development," Applied Physics Laboratory Technical memorandum TG-882, March, 1967.
- [8] J. Fran H. M. Grady, J. H. Kuck, and C. A. Shipley, "A 256-Element Phased Array Development," in preparation (Applied Physics Laboratory).
- [9] D. K. Barton, "Radar System Performance Charts," IFEE Trans., Vol. MIL-9, pp 255-263, July-October, 1965.

相控阵天线在宇宙飞船上的应用*

W. H. Kummer

A. Kampinsky

本综述报告评论了目前宇宙飞船上工作着的相控阵天线系统,用以揭示波束形成,控向和接收/发射(应答器)功能的基本技术。文中还用通信、地球资源测量仪器和地域监视的要求评定了为宇宙飞船最终合格飞行设计的实验室研制天线。

一 引 言

天线设计者有许多种能满足宇宙飞船所需的辐射特性的天线可供选择。很多参数约束了整个卫星系统的设计;这样选中的任何天线系统都要采取很多折衷办法。主要参数包括飞船的稳定类型、轨道的类型、天线覆盖面积、有效体积、重量、功耗、可靠性、增益和独立连接的数目。旁瓣电平、波束灵活度、两个面中的大扫描角和跟踪精度等因素在大部分通信应用中只起次要作用,但在监视和测量仪器的应用中可能是重点因素。

如果使用高增益天线,就能改进系统性能。然而高增益意味着卫星天线的波束可能要比所需的总覆盖面要窄。因此增加天线增益带来了一个新的要求,即把窄波束转到覆盖区域的所要部分。随着增益的提高,需要的瞄准精度也提高了。波束的控向涉及两种限制,一是卫星姿态控制能力的限制,二是在任何给定时间测量卫星姿态的一些误差。第一个限制意味着当卫星姿态改变时,必须连续地转动非常窄的波束,以保持所要的瞄准方向。第二个限制使波束相对于卫

星的瞄准方向产生了一些误差。此外,也存在这样一个问题:在任何特定的飞行中应该对卫星姿态控制到怎样的程度。从以上叙述可以清楚地看到天线增益、波束控向要求和卫星方向控制要求是紧密地互相联系着。因此,提高增益的含义是如此重要,以致研究天线技术必须成为任何一个飞行任务总体设计的一部分。这些技术的特点(电气的和机械的)构成了在系统重量、精度和可靠性折衷方案的基本部分。对于一个特定的飞行任务,必须进行实际可行的折衷。与控制飞船姿态的技术相比,这些折衷依赖于天线波束的定向或转向技术。

机械转向天线应用于宇宙飞船已经有很长的历史了,因此本文只评论电子转向阵列。下文要讨论的几种阵列是完整的应答器系统,当用总功率、重量、体积和可靠性来与分立系统比较时,必须作为完整的卫星应答器而不是单独作为天线判断它们的优点。在以下几节中将讨论相控阵在通信、消自旋波束、地面观

* "Phased array antenna for applications on spacecraft", pp. 30~42(汤宝兴译,召雨校)。

察和测量仪器中的应用。

二 多信道通信的天线阵

通信尤其需要能同时连接空间上分散的多个小型用户的高增益天线。其应用包括数据延迟卫星、导航和交通管制卫星和广播卫星。这与宇宙飞船姿态的控制是不相容的，并且排除了采用机械激励天线。现在满足这样要求的实验室演示天线根据两种波束形成原理——全电子、自控向、领示信号波束控制阵列和分立波束（矩阵或透镜和馈源）阵列——进行工作。这两种系统都能应用到装载在 NASA ATS F&G、数据延迟卫星和地球资源卫星或任何一个三轴稳定宇宙飞船上的通信和地球资源考察仪器中。

引言中已指出，高增益波束的形成需要同时研究对它们的控制。有两大类型：一种需要外部控制来正确地给单元调相；一种则是自控向。外部控制的系统（如常规的相控阵）需要用外部指令对扫描控制器和调相网络进行程序控制以便在指向用户的合适方向上形成和瞄准波束。卫星阵列相对于用户地址的姿态是指令系统需要的一个参数。在自控向，即自适应系统中，电子电路传感输入信号以给单元调相。

1. 自控向系统

为了获得所需要的孔径相位增进，自调相阵列通过混频法使相位反转。有很多形式的相位反转系统，每种形式在给定的情况下都有其特殊的优点。图 1 示出的是一种最简单的线路^(1,2)。从图上就可以看出基本工作原理：通过混频器(m)在每个单元上使输入信号反相，为在信号输入的方向上把信号再传输回去创造必要条件。信息可以在本机振荡器送回所需方向的信号上进行调制。实际应用中，获得高放大器增益和在中频而不是射频上完成某些滤波功能更为简单。

X 波段转发器 已经设计、制造和测试了一台卫星对地球通信的自控向转发器的工程模型⁽³⁾。这个系统是作为位于 30 度圆锥覆盖面内任何两对地面站之间的中继站设计的。卫星假定在同步轨道上，并假定姿态的重力梯度稳定误差为 ± 5 度。

该系统有两个独立的调频/调频信道，都在 8 千兆赫的频带内接收，在 7.3 千兆赫的频带内发射。每个信道有一个 125 兆赫的射频带宽。转发器沿着 ± 15 度覆盖角内的任意方向控制转动四个独立的高增益波束（两个作接收，两个作发射）。波束的位置由从地面站产生的连续波领示信号中获得的相位信息加以控制。领示信号的功能是向每个接收天线单元提供相位信息。在总是存在载波的系统，载波就可用作领示信号用。为了节省产生领示信号的地面站总发射功率，领示信号的功率和带宽与信息频段的功率和带宽相比

是小的。在本文所有的讨论中都是采用连续波领示信号。在实际系统中这些领示信号适当地编码以减少射频干扰和将波束折向不需要的方向。使用的波束名称和频带如图 2 所示。

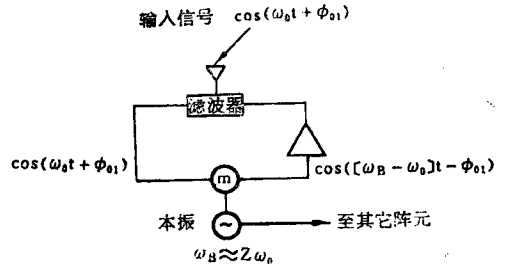


图 1 基本的阵列模块(图中阵元系单元之误，下同)

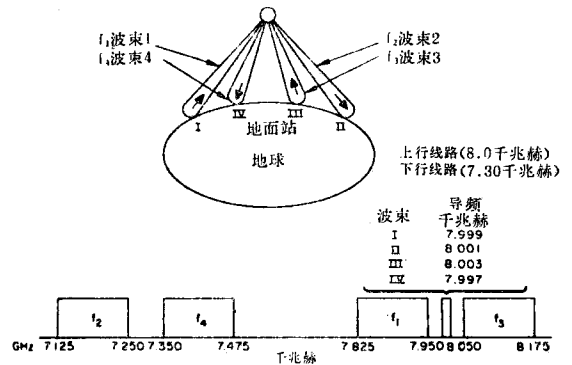


图 2 自控向转发器用的波束名称和频带

对于图 3 所示的系统，接收领示信号、发射领示信号和调制信号由接收单元接收，通过一个高通滤波器，向下转换成中频，再由一个宽带中频前置放大器放大。前置放大后，通过三路分离器把两个信息带和领示信号分开。然后领示信号再向下转换成第二中频以便使用频带非常窄的带通滤波器建立良好的领示信号信噪比。这些带通滤波器包括四路分离器，除了限制领示信道的噪声带宽外，还起分开领示信号的作用。领示信号通过上述装置后，向上转换成约 200 兆赫，使得它们能与宽频带的调制信号混频而没有功率谱的重迭。

参考图 3，450~575 兆赫的信息带通过三路分离器到达宽带混频器*。206 兆赫接收领示信号也到达这个混频器。如果这两个信号混合起来，保留下边带，那末得到的中频信号的相位将与单元上信号的相对相角无关。这些混频器(一个单元一个混频器)的输出信

* 另一个 675~800 兆赫的信息频段以相似方法处理。

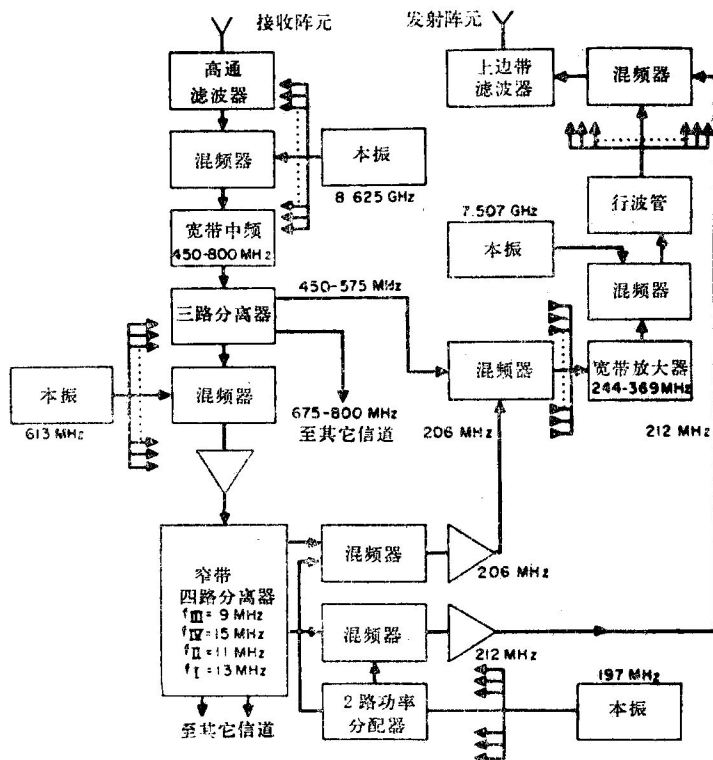


图3 高增益自控向工程模型的示意图 (导频的下标与图2中所示的波束下标一致)

号同相并相加。在相加点，对信息信号实现了接收阵列增益。

信号在中频上放大，向上转换成射频再放大，然后分配给最终的发射混频器。在这些混频器里发射领示信号与调制信号混频，由混频器后面的带通滤波器选择上边带，在一个发射单元上产生一个调制信号。这个信号有一与相应的接收单元上的发射领示信号相角方向相反的相角。这个条件对在发射领示信号的方向上从天线系统发射信息是必要的*。在这个特定的设计中采用两个阵列，一个发射，一个接收(图4)；它们是按波长比例制作的，以避免产生波束角差。对于工作在较低频率而要求相似增益的系统，由于尺寸和重量的限制和发射飞行器的装载问题，只能用一个阵列。对于间隔很宽的发射和接收频率，需要消除波束角差⁽⁴⁾。为了获得正确的相位比例，提出了几种采用电子电路、阵列比例和这两种结合的几种方案^(3,5,6)。

系统的测试结果一般是令人满意的，显示出高质量通信信道的性能⁽⁷⁾。表1总结了工程模型的特性。

S波段转发器 目前，正在用全固体“微型”电路研制以领示信号控制多波束阵列⁽³⁾的原理为基础的一种双波束、双信道S波段相控阵的一小部分，以便外推出增益为40分贝的完整阵列的电气性能而其估

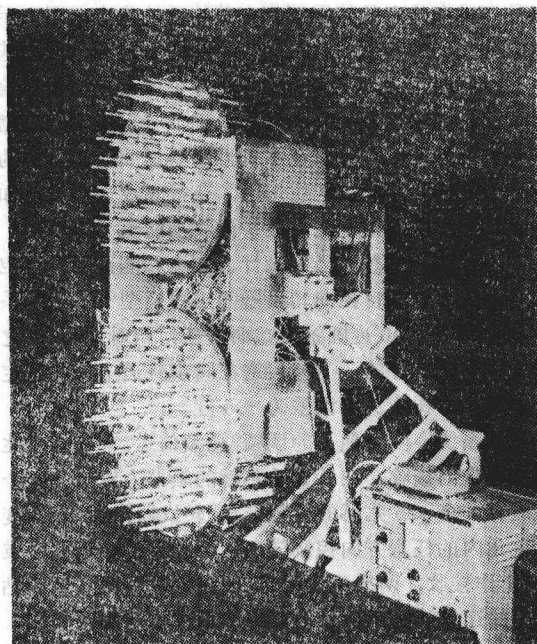


图4 完整的转发器

* 另一个信息频段通过图3上没有画的二路分离器也送进同一个发射单元。

表1 工程模型的特性

| 参 数 | 工程模型的设计目标 | 测得性能 |
|---------------------------|-------------------|-------------------|
| 两个阵列各自的单元数目 | 64 | |
| 信道数目 | 12 | |
| 每一信道的射频带宽 | 125 兆赫 | 125 兆赫 |
| 两个信道间的保护频带 | 100 兆赫 | 100 兆赫 |
| 总覆盖区 | 30 度 | 30 度 |
| 最小单元增益 | 11.6分贝 | 12.4分贝 |
| 最小阵列增益 | 29.8分贝 | 30.4分贝 |
| 极化 | 圆极化 | 圆极化 |
| | | 轴向比 = 0.8分贝 |
| 混频器-滤波器前置放大器平均噪声系数 | 15.2分贝(最大) | 14.4分贝 |
| 每个信道的有效辐射功率 | 28.0 分贝瓦 | 27.8分贝瓦 |
| 使用 125 兆赫带宽时领示信号-调制信号的功率比 | -10分贝 | * |
| 姿态读出精度(最小) | ±0.5 度 | ±0.5 度 |
| 接收机功耗 | 32.0瓦(不包括本机振荡器) | — |
| 领示信号处理机功耗 | 108.7 瓦 | 182.6 瓦 |
| 姿态读出功耗 | 0.9 瓦 | — |
| 整个发射机功耗 | 201.1 瓦(不包括本机振荡器) | 87.9瓦(不包括本机振荡器)** |
| 主电源功率(除供电功率外) | 324.7 瓦 | 270.5瓦 |
| 总重量 | | 180.0公斤 |

* 比设计值低得多的领示信号比率是从电视测试上测得(参见参考资料[3]);

** 电耗是指发射机的一个信道。对于双信道工作需要小于这个值的二倍。

计主要功耗、重量和大小⁽⁶⁾。每个接收波束和由此产生的发射波束都瞄准产生特定领示信号的用户。数据通过对着一个地面站的自控向阵列转播出去。最大射频带宽是 10 兆赫。

这个系统包括活动用户卫星频率的捕获和跟踪电路。多普勒频移变化率保存起来, 这样就能测得用户和地面站之间的相干距离率。这个计划仍在进行中, 目前正在鉴定电气性能⁽⁶⁾。信道模块的特性列于表 2 和 3。

表2 中频模块

| 频 率 | 100 兆 赫 |
|--------|---------|
| 波束数目 | 2 |
| 数据带宽 | 10 兆赫 |
| 领示信号带宽 | 20 赫 |
| 重 量 | 250 克 |
| 直流输入功率 | 533 毫瓦 |

表3 S波段模块

| 射 频 模 件 | 接 收 | 发 射 |
|---------|-------------|-------------|
| 频 率 | 2200~2300兆赫 | 1760~1840兆赫 |
| 波束数目 | 没有限制 | 2 |
| 噪 声 数 | 8.0 分贝 | |
| 射 频 功 率 | | 60 毫瓦/波束 |
| 直流输入功率 | 2 瓦 | |
| 重 量 | 210 克 | |

2. 多波束系统

自控向多波束转发器 分立控制的多波束阵列的一种特殊结构采用 Bulter 矩阵⁽⁶⁾ 构成高增益天线。该天线接收任意方向上来的瞬时信号, 在向选择的方向上重新辐射信号之前, 信号先经过放大和频率变换⁽⁴⁾。该系统有二个 4×4 螺旋单元的阵列、二个波束形成矩阵⁽⁶⁾、两个分开的射频部分(一个用于 4 千兆赫发射, 一个用于 6 千兆赫接收)。这个系统的圆锥覆盖区是 50 度。4×4 波束形成矩阵的主要特点是可得到 16 个各别的波束或波束指向, 通过把能量馈送到合适的波束口就能选择任何一个波束或方向。波束重迭起来在空间形成对称于侧射方向的 4×4 束集。多波束天线系统的工作用图 5 的示意图说明。

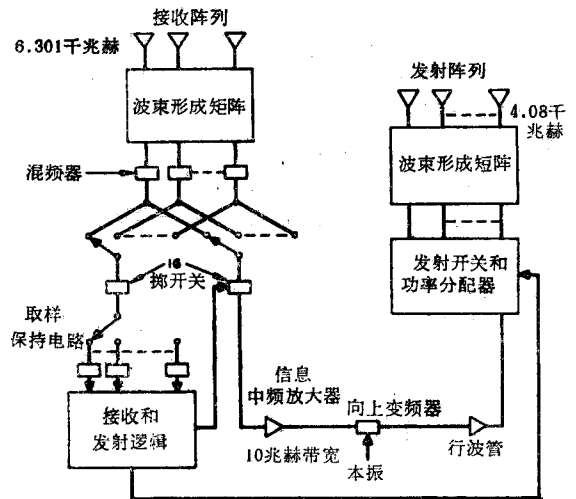


图5 多波束天线系统的示意图

6 千兆赫的接收系统处理接收和发射逻辑。发射系统的正确工作需要接收和发射天线波束相一致, 阵列和单元都是按适当比例做的。领示信号由 6 千兆赫的阵列及其波束形成矩阵接收。来自矩阵各个波束口的所有信号向下转换成中频。领示信号通到 16 掷的取

样开关，它的输出端接到一个中频放大器的输入端。在中频放大器的输出端恰当地滤波后，每个领示中频信号进行视频检测并储存在取样保持电路中，每个波束口有一个保持电路。这些取样保持电路与16掷开关同步，这样一个特定取样保持电路维持那个特定信道的电压，直到它再次取样为止。取样保持电路的输出与每个天线波束接收到的功率成正比。

接收逻辑的功能是确定有最大接收领示信号的天线波束和通过把一个电压加到另一个与10兆赫信息信道相连的16掷中频开关上使信息信道合上这个波束。然后放大的信号向上变频，上边带加到行波管放大器的输入端上。行波管放大器把信号电平提高到从天线系统发射出去所需的水平。

由于每个波束的等幅面构成一个圆，故在覆盖区内增益不是恒定的。在两个邻近的重叠波束具有相等的增益处，增益比峰值约降了4分贝。在四个邻近的波束具有相等的增益处，天线增益比峰值增益约降8分贝。由于使用不同的波束，当天线系统从一个波束转到另一个波束时，也产生很大的开关瞬变现象。为了消除邻近波束和开关瞬变之间振幅变化效应，发射波束连续扫描。利用各别的但重迭的波束以形成一个连续的移动波束。这种改进是通过使用四个适当加权的邻近重迭波束形成一个新波束来实现的，这个新波束连续扫描以跟踪发射领示信号。虽然这种扫描波束随扫描而有较小的振幅变化，但是没有显著的无信号区，也没有显著的开关瞬变。波束方向由数字铁氧体开关和铁氧体可变功率分配器控制。设计正确时，从16个波束综合取出一个波束扫描，只需三个功率分配器和12个单刀双掷数字开关⁽¹⁰⁾。

采用Bulter矩阵的自控向多波束阵列需要的逻辑电路⁽¹⁰⁾与用于常规的相控阵的电路一样复杂。然而利用“微型电路”可望显著地减少重量和电耗。因此，波束选择所需的逻辑将来会有应用。

这种概念采用附加电路后能扩展到更多的独立信道。预料将会采用具有高增益波束的较大的多波束阵列。但是随着波束数目的增加，Bulter矩阵的损耗也越大。为减少射频损失，接收时可用射频前置放大，发射时可用后置放大。另外的多波束系统也可予以考虑，如下文要讨论的多波束馈源和透镜。

3. 覆盖区可变的通信天线

设计这种天线系统是为了从同步高度向地面提供一个可变化的覆盖区。覆盖区能从3°笔形波束到覆盖整个地球之间变化。这种阵列的卫星用三轴稳定固定。

这种系统包括一个波导透镜、一束十九个馈源和一个开关矩阵。选择焦距直径比为1.0的双凹面波导

分区透镜⁽¹¹⁾。馈源束是圆锥喇叭的六角形阵列，每个喇叭的孔径为2吋，间距也为2吋。图6是透镜天线。该系统工作于X波段，总带宽约为15%。两种方向的极化都采用了，一种用于发射，一种用于接收。

19个3°波束宽度在设计频率上的方向性是31.5分贝±1/2分贝。邻近波束之间的交叉点电平为4.5分贝，三个重迭波束的等增益处为8分贝。相等能量馈送到所有波束的地面覆盖方向性为21.5分贝，峰值间的变动为2分贝。所有的测量是指波束口处的，不包括开关矩阵或连接网络的损失。在扫描角从侧射方向算起为7个波束宽度的情况下，频段边上的增益约降低了1分贝。

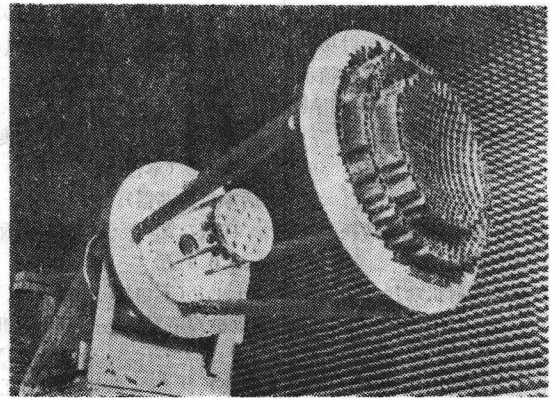


图6 实验型透镜天线

带可变功率分配器的组合馈源正在设计中(如图7所示)。为了提供灵活的波束成形和转换，它能使功率以任何所需比例在19个馈源中分配。其中将采用单根铁氧体芯的不可逆铁氧体移相器(图8)。发射和接收将采用单独的网络。实验型的透镜和馈源系统的重量是27公斤。飞行模型可望为2-1/2公斤。这些重量都不包括馈源网络和功率分配器。

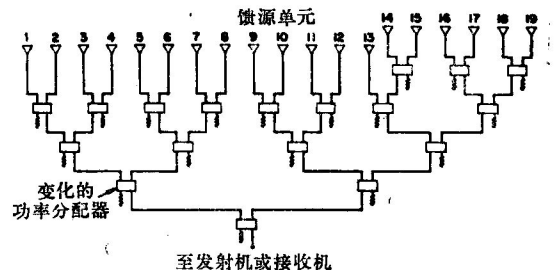


图7 推荐的组合开关(图中“变化的功率分配器”应为“可变功率分配器”)

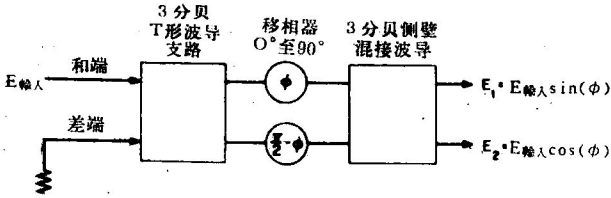


图8 功率分配器(图中的端字改为口字)

4. 30呎抛物面的电子控制初级馈源

目前正在为ATS-F宇宙飞船上的30呎抛物面研制多用途馈源系统。一种S波段电扫描馈源将用于通信和单脉冲信号跟踪。圆柱形喇叭、一个比较器和一个功率分配器构成这种系统。单刀七掷二极管开关和环形器组成S波段开关系统。一组4个开关把来自功率分配器的信号通过四个环形器送到四个选择的馈源喇叭中去。当从所需的方向上接收到信号时，在最近这个方向上形成一个波束的四个喇叭由第二组四个开关通过四个环形器与比较器耦合。逻辑和开关激励器电路为独立的接收和发射波束位置提供合适的开关二极管偏置状态。波束位置指令由逻辑电路收自遥控指令解码器。

形成的一个发射波束和一个接收波束能独立地扫过有限覆盖区。波束宽度约为1度。

三 自旋稳定的宇宙飞船天线

采用另一类重要的天线技术(自旋稳定)的宇宙飞船天线要求在NASA的应用技术卫星(ATS)和空军林肯实验室实验卫星(LES)和国内防御通讯卫星计划(IDCSP)的飞行实践中得到了验证。这些飞船装载的自旋天线在一个平面内由电子控向360度;波束是反旋的,始终瞄准地球。这些天线系统是在实际飞行条件下工作的,因此设计技术得到了证实。

1. ATS-1的4千兆赫阵列

几种消自旋阵列已在NASA的ATS卫星上使用。第一个圆柱形的发射阵列(ATS-1)工作于4.1至4.2千兆赫,由在半径为一个波长的圆上间隔排列的16个单元组成⁽¹²⁾。圆阵列的每个单元由许多半波偶极子的共线阵列组成。馈送到移相器的功率分配器是带状线装置,移相器到线性阵列的耦合也是带状线装置。图9所示的是一个完整的阵列。阵列由通向8个铁氧体移相器的功率分配器供电。每个移相器有两个共轭输出端给两个对径点上的单元馈电。这种移相器兼有Fox和同步铁氧体移相器的特性。为了使阵列扫描,给每个移相器加上变化的电流。产生这种电流的目的是沿着阵列引起步进相移。这种步进相移在时钟脉冲控制下使射频场与飞船同步旋转。飞船上的太阳能传感器

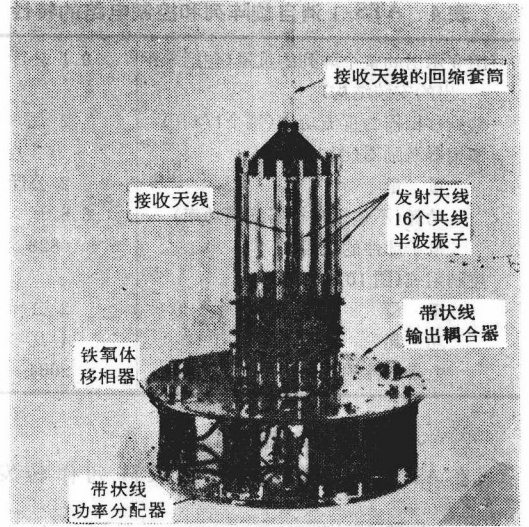


图9 应用技术卫星圆形相控阵

为控制提供基准。此外也可采用地面指令。

控制电子电路给铁氧体移相器产生一组16个控制电压。系统简图如图10所示。这种系统采用太阳能传感器作输入基准。对于每个输入脉冲,频率锁定环路产生 $2^9=512$ 个脉冲。频率锁定环路的输出激励波束定位器,定位器又以适当相位激励16个正弦波发生器以给波束定位。正弦波发生器激励输出波形发生器和移相器激励器,为移相器的线圈提供所需的波形。

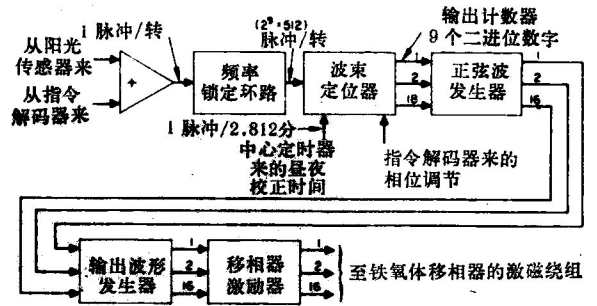


图10 圆相控阵的控制系统简图

在飞船上测出这个频段的最小阵列增益为13.5分贝⁽¹³⁾。与16.4分贝的方向性相比,这个差异是由于失配、阵列中单元的遮蔽、带状线的损耗、单元匹配网络的损耗和移相器的损耗而产生的。带状线和移相器两者的损耗在1.5至2.0分贝之间。一个典型的移相器的损耗为1分贝。依据工作频率这个数值在工作温度范围内约有 $\pm 1/4$ 至 $\pm 1/2$ 分贝的变化。整个系统的重量、功耗如表4所示。