

International Conference

RADAR-87

国际雷达会议录



机械电子
工业部 电子系统工程专业情报网

雷达的用户教育*

David K. Barton

引言

要使雷达顺利地进行研制和生产,一个至关重要的要素是受过教育的用户。这里,“用户”是指设备的最终用户,而不是那些进行科研生产管理的官僚机构。作为工程师,我们负有教育的责任,即帮助用户了解雷达能够做什么,不能做什么;指导设备的设计,力求其切合实际和经济实惠;还要规划新技术的开发,使之能为用户提供更为实用的新设备。

依照惯例,在这样一个雷达工程师年会的开幕词里,应该热烈祝贺我们已经取得的成功,和在今后几年内预期可以达到的更大的成功。毫无疑问,在这一方面有许许多多话可以说,诸位会在这次会议的一系列论文中看到这一点。但是,首先应当认识到,作为一个学术团体,在过去二、三十年中我们在给用户提供可以使用的设备方面并不是非常成功的。在民用航空交通管制和军用方面情况确是这样。如果我们能够弄清问题的实质并且剖析清楚的话,就有可能在今后的几十年内改进我们的纪录。这个问题在很大程度上是怎样使新技术与用户的需要相适应,这就是我在这篇祝词中所要谈的话题。在用来规定雷达技术条件的各种“性”**中,最容易被忽视的就是可生产性,而它又是与系统设计的切(合)实(际)性有关的,技术应当为可生产性,切实性,以及雷达性能和其他的“性”服务。

雷达技术的三个重要领域是信号处理,阵列与天线和发射信号的产生。在这三个领域中,雷达分系统都有广泛选择技术的余地,从而使性能、成本和可生产性等发生重大差别。在信号处理方面,我们应对接收机带通滤波、脉冲压缩、MTI和多卜勒滤波,以及门限调整等的要求进行审查,看看有哪些基本原则可以用来避免重大错误。在阵列与天线方面,我们要考虑单波束形成和扫描,单脉冲波束形成,堆积波束和波束簇的形成以及自适应零值点调整等的各种不同实现方法。在功率产生和调制方面,要考虑电子管与固态器件的关系,还应考虑频率和带宽选择等问题。

雷达信号处理

典型的雷达接收机和信号处理器的构成如图1所示。对于使用快速电子调谐,带宽为

*“Consumer Education in Radar”, pp.1—6 (李熹林译 曾俭恭校)

本文是作者在一九八七年国际雷达年会上的开幕词。作为基调发言,涉及雷达技术发展的主要方面及其用户教育问题。——译注

**原文为“ilities”,意为多种以“ility”结尾的表示性能的词 的概括。如producibility可生产性,availability可用性,practicality切实性等。——译注

10%的系统，射频前置放大器前面装有一个带通滤波器，其后则是一个二次变频超外差接收机。第一中频可以是超高频（UHF），而第二中频为30兆赫或60兆赫。脉冲压缩滤波器将长时宽脉冲（例如时宽40微秒，带宽5兆赫）变换为1微秒或更短的输出脉冲。脉压之后是距离选通，距离单元数可多达1000个，每个距离单元的输出去到一个由16个或32个多卜勒滤波器组成的滤波器组。对这些总共有16000个或32000个多卜勒滤波器的输出进行包络检波，然后对若干个相参周期的检波输出进行非相参积累和门限判定。门限受到恒虚警率处理（CFAR）和杂波地图的调整。

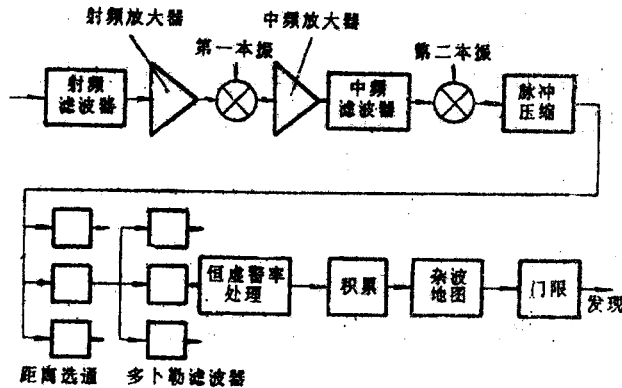


图1 典型雷达接收机和信号处理器方框图

接收机两端的处理技术的选择是非常容易决定的，在输入端的射频滤波器（其工作频率可能为10千兆赫，带宽为1千兆赫）是一个模拟器件，由波导或腔体构成；在接收机输出端的多卜勒滤波器，包络检波器，检波后积累器，杂波图和CFAR检测器都由数字电路完成。在系统的中心部分，中频滤波器可以是模拟的也可以是数字式的，目前更倾向于在第一中频采用模拟式，脉冲压缩滤波器采用声表面波（SAW）器件。如果要使用多种脉冲压缩波形的话，那么可能更倾向于采用数字滤波器，而且现在在第一中频采用数字滤波器也是可能的。究竟应当怎样进行选择呢？当然，不能只顾选用最高级的和最先进的技术。只消看一个简单的例子便可以清楚了。

无线电工程中一个最普通的滤波器问题是固态广播收音机的中频滤波器的制作。滤波器调谐在常用的中心频率（例如465千赫），带宽要求为6到10千赫，以获得良好的边带选择性。利用数字技术，有可能用每秒执行几百万次操作的16位小型微处理器完成这样的滤波功能。另一方面，却可以用两三级放大器和模拟滤波器级联来达到同样的效果，该滤波器可采用双调谐LC滤波器或机电滤波器。从而使整个收音机的价格只有10美元以下。谁也不会认为高成本微处理器滤波器会受广播听众（特别是那些在公园或海滨使用收音机的青年）欢迎的。

在雷达信号处理中，我们经常遇到许多试图用等效的高技术办法去解决简单的问题。常见的合乎情理的要求是用户希望采用先进的数字技术来解决，这时，我们就不能用过时的模拟方法使他们失望。不过，即使是对于雷达，如果用常规的方法能够既简单又便宜地得到良好的性能，那么，就应当把这种情况告诉用户，并且公正地对简单方法与复杂方法进行比较

研究，将其优点告知用户。

阵列与天线

雷达天线的基本功能是形成一个或多个具有规定形状、增益和副瓣电平的波束，并使这个波束或波束组指向某个方向或是在所要求的区域内扫描。根据天线的基本理论，我们知道， $1^\circ \times 1^\circ$ 的笔形波束要求孔径为60个波长左右。如果我们把孔径分为 $(\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2})$ 的小单元，那么约有10000个小单元。这里可以有几种选择办法：孔径可以由一个喇叭馈电的连续透镜或抛物面反射器；或者是有10000个裂缝的波导阵列；或者是由一个功率分配网络馈电的偶极子或等效辐射器阵列。裂缝或单元的实际间距可以大于 $\frac{\lambda}{2}$ ，但是，如果要求低副瓣的话，孔径就应该比 60λ 大一些，才能保持单元数为10000个左右。我们究竟应该怎样选择天线结构呢？

反射体天线

为了接收卫星直播电视，我们可以买一个 $1^\circ \times 1^\circ$ 圆盘型抛物面天线，其价格大约为500美元，或者说每一个单元约5美分。而雷达所用的盘型反射体和馈源，其费用可能要比它多十倍。一个具有同样波束宽度，能在两个坐标方向上电扫的相控阵天线，价格可达数百万美元。除非我们有强烈的动机，而且用户又有雄厚的资金，才会接受这种成本成十倍增加的办法。只有特殊要求的系统才会采用相控阵方法，但一般都不会采用，这就是为什么达到实际生产阶段的相控阵雷达较少的原因。但是尽管如此，我们中的许多人还是必须向管理部门或用户说明为什么选用简单的抛物面天线，而不选用昂贵的相控阵的理由。

相控阵天线

相控阵天线最重要的特点是它能够快速地和不连续地在一个象限角的空间内扫描。举个例子说，如果要以每秒钟若干个采样值的速率同时跟踪10个或20个目标的话，用10部或20部抛物面天线的雷达就是不合理的了。如果天线需要抗冲击波，则选用掩蔽在钢筋水泥中的相控阵天线（如果要求复盖整个半球空间的话，可以用4个这样的阵列）是合乎逻辑的。这种情况最适合用相控阵雷达。

但是，用作警戒时，通常需要在搜索空域中有成千个波束位置以满足空间分辨的要求。为了抑制杂波，采用相参处理，就要求在每个波束位置上停留相当长时间（例如10毫秒）。这样就需要有十个以上的波束并行扫描，以便在适当的时间范围内复盖整个搜索空域。这种情况最好选用堆积波束三座标雷达而不是电扫阵列雷达。用平面阵产生这些（堆积）波束的几种实用办法是用若干个具有固定移相元件的行馈组件构成射频、中频或数字式仰角波束形成网络。也可以用由竖直喇叭阵列馈电的反射体天线来完成。选择时应以成本和性能为准，而不是看哪种技术更新或者更复杂。

低副瓣天线

二十年来，雷达界普遍确信低副瓣天线必须采用相控阵方法，并向用户灌输这种观念。的确，在雷达领域，阵列系统展示了迄今可以获得的最低的副瓣电平，其方向图如图2所示。但是，先让我们将它与图3的天线及其方向图做比较，然后再看看卫星通讯方面目前的

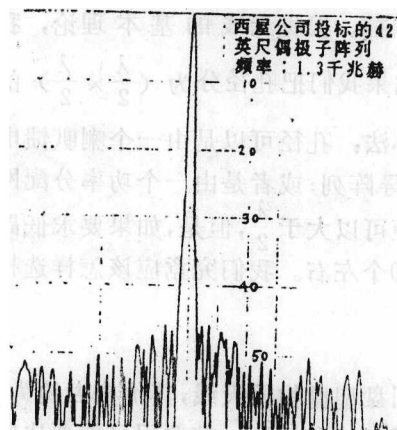


图2 超低副瓣偶极子阵列典型方向图

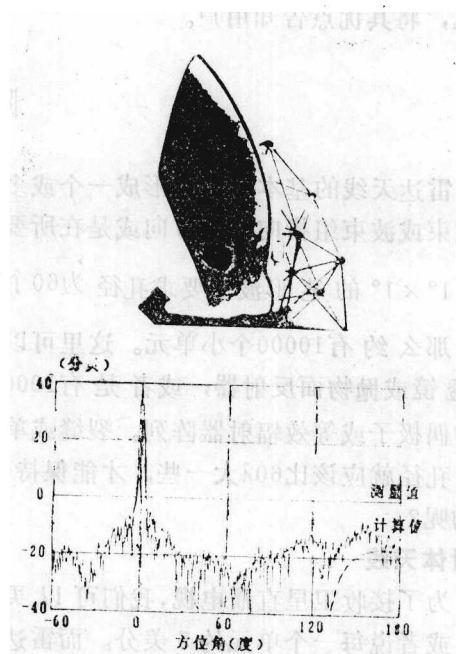


图3 超低副瓣反射体天线及其方向图

情况。图4示出格里高伦反射器天线业已达到的性能水平。在通讯领域中反射体天线能够产生比阵列天线更好的方向图，成本也便宜，无论是就低副瓣而言还是在多波束形成方面，雷达工程师及其用户都可以从中学到有益的东西。为什么我们会忽视这个事实呢？因为我们对于复杂而先进的技术的印象过份深刻了，而反射体天线却是有数十年历史的古老技术。

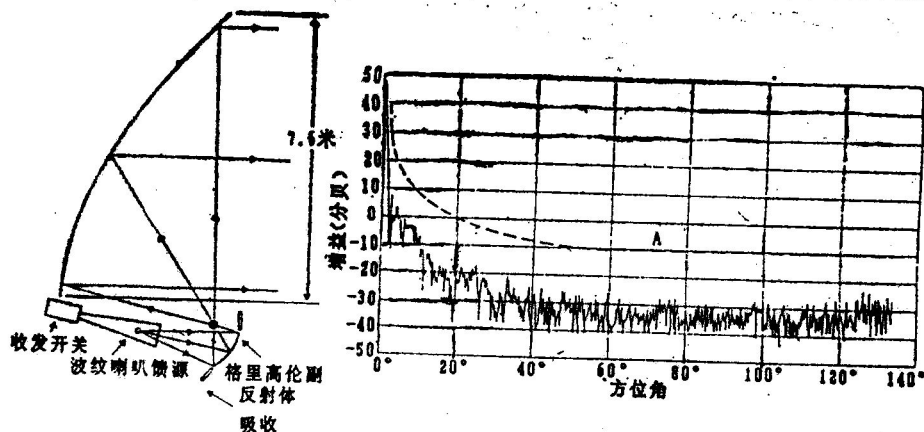


图4 超低副瓣通讯天线及其方向图

数字波束形成

数字波束形成真正是一种新技术，看来它在今后一、二十年内将和相控阵技术在过去二十年内所起的作用一样。数字波束形成器不仅能产生三坐标雷达和单脉冲雷达的多波束，而

且能够自适应地改变方向图，使零值点对准干扰源的方向。图5是数字波束形成系统的概貌，其中有 N 个天线单元， N 个由这些天线单元馈给的接收机， $2N$ 个相位检波器和A/D变换器，以及波束形成和零值点定位所必需的处理等。波束形成系统以与信号带宽相同的速率工作，首先要完成 N 重二维傅立叶变换处理，然后可以选择形成三座标或单脉冲雷达工作所需的波束。副瓣控制是通过对波束形成前的基本信号加权实现的。自适应零值点的实现方法是先形成单元通道的 $N \times N$ 协方差矩阵，对它求逆以算出单元的权系数，然后把这些权系数加到波束形成前的基本信号中去。请设想一下，一个有10000个单元的信号带宽为10兆赫的阵列所需的处理量将多么惊人。未来的高速集成电路设计师们将乐于去解决这项繁重的计算任务。

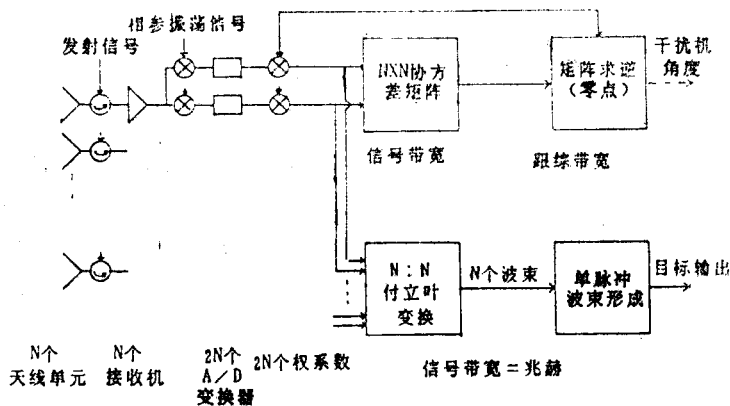


图5 自适应干扰零点数字波束形成

光学波束形成

对于上述问题还有另一种解决办法，这种办法很实用，但不具有先进新技术的魅力。这就是光学波束形成方法。图6示出单波束形成的过程。波束由称作空间馈电的光学傅立叶变换计算机来形成。指向由各个单元中的移相器控制。加权是通过修整馈源喇叭的形状或是采用比较复杂的馈源结构（波纹喇叭或多模喇叭）获得的。

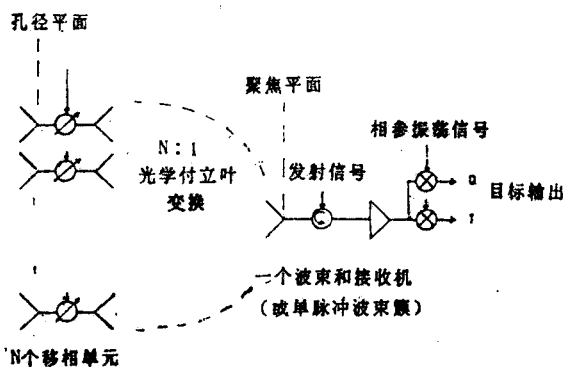


图6 单波束或单脉冲波束簇的光学波束形成

指向由各个单元中的移相器控制。加权是通过修整馈源喇叭的形状或是采用比较复杂的馈源结构（波纹喇叭或多模喇叭）获得的。为了形成多波束、单脉冲或者超低副瓣天线，可能需要在透镜的聚焦平面上使用比较复杂的馈电网络。也可以将这些网络与接收通道装在一起从而实现自适应零值点工作——至少可以在扩大的馈源喇叭所复盖的角范围内实现。如果机械转动问题能得到解决，这种方法甚至可以用到偏馈抛物面反射体上。为什么这类系统至今

没有用到雷达中呢？我想大概是因为太简单太实际了，使许多雷达研究单位和用户不感兴趣

的缘故。当务之急是对用户进行教育使其持现实的态度。

射频功率的产生

雷达微波功率管的发展史就是其工作频率越来越高，功率不断增加的历史。在第二次世界大战结束时，人们已普遍相信，将来的雷达发展将是不断提高其工作频率，且受可用功率源及其有关元件的限制。不久甚高频（VHF）（以及大部分超高频UHF）雷达波段被废止。甚至到今天，我们仍然能听到许多关于雷达毫米波革命即将到来，以及可用的功率源即将问世的议论。在较低波段上，可用功率早已达到了充气加压波导所能承受的极限，而且脉冲压缩又使得平均功率大大增加了（在击穿限度之内）。在一些极高功率的系统中，使用模件阵列可使系统总功率在单个波导不超过其击穿限度的条件下得到了进一步的提高。

微波功率管

在这段期间，总是想从单只电子管中得到尽可能大的输出功率，只是在绝对必要时才采用多管方式（其结果是使成本和复杂性提高）。推测起来，这大概是出于成本方面的考虑，因为在管子数很多时要同时保持这些管子的输出在幅度和相位上一致是非常困难的，而且还需要多个电源和射频功率合成器。这种追求高输出功率的结果是管子设计遇到了灯丝发射，散热和击穿电压等的限制，还引起了许多至今未能解决的可靠性问题。可靠性低也是这些管子生产量小的原因。

固态微波源

大约十年前，晶体管技术的发展使得研制固态雷达发射机开始成为可能。不过在那时（今天也是一样），即使是用先进的器件，在微波波段得到的功率还是小得可怜。但是固态器件工业界没有因此丧失信心，他们打入市场的努力得到了可靠性工程师的帮助。他们指出，输出功率不足也是一种优点：必须把大量的功率源结合起来使用，这就有了很大的冗余度和很高的可靠性。过去雷达用户由于经济原因不愿接受双管发射机，现在由于可靠性的缘故，他们却开始坚持要那种由成千上万个固态源组成的组件化发射机。

波形考虑

普通的固态设计——即使是采用多模件方式——在经济上仍然不能与电子管发射机相匹敌，除非是将雷达波形改成可使用很高的工作比。其结果是目前正在设计的雷达系统，最大检测距离所需要的高功率脉冲要消耗将近一半的作用距离成为非检测段。因此用加上第二个（有时甚至还有第三个）脉冲来复盖被长脉冲遮挡的距离段。不幸的是，在遇到电子对抗或是目标横截面积大大减小时，这种系统就完全不能检测到目标，使看不见的敌人得以渗入和导致雷达及其阵地遭到袭击。此外，高工作比还使得陆基雷达的杂波问题很难解决。

这并不是说不能设计出完善的雷达固态发射机。一个著名的例子就是美国海军要求设计一部峰值输出功率250千瓦，工作比5%的固态发射机来直接取代现用的电子管发射机。根据这一要求，固态发射机设计师们提出了一种实用的结构，这种结构现在已经投入生产并成功地应用于该雷达。不过，这毕竟是个别的特殊例子，而且它的成功在很大程度上得之于较低的工作频率（425兆赫）。这只是说明如果我们把这种工作状态的作为雷达的一项性能指标如实告诉用户的话，那么高工作比不是固态发射机所固有的特征。

雷达性能的基本限制

除了技术之外，雷达工程师还必须考虑物理学在雷达系统中的作用。雷达波的传播就是其中之一，它是不会去迁就新技术的（事实上，许多新技术必须服从电波传播的要求）。大气衰减和多路径传播现象就是挡在某些我们最希望采取的技术途径上的异乎寻常的障碍。雷达方程是以简单的几何学和物理学原理为依据的，它本身就不容许那种想把雷达做成什么样就做成什么样的想法。雷达技术不太会影响目标散射的物理现象，飞行器设计师们正是利用这点来使雷达工程师的任务更加艰巨。低空飞行器利用杂波的物理现象去袭击大多数雷达；当自然界杂波不够时，还可以加上人工杂波。

由于雷达存在着这些障碍，因此任何设计即使采用了最好的技术，但是在具体应用中其作用都不能充分发挥。如果用户不认清这个事实，他会随便地提出一些注定会遭到失败和挫折的要求，甚至在支持技术发展的重大计划时也会如此。这样会使雷达工程师陷入十分尴尬的境地：一方面他在研究难题时能够最佳地发展技术，而另一方面为了获得技术开发的投資，他又往往必须去解决不可能解决的问题。雷达工程师应当告诉用户哪些有关雷达的实际而又严酷的事实呢？他敢不敢根据雷达的具体用途，切合实际地提出雷达应该采用模拟信号处理，反射体天线和电子管发射机？对于受过教育的用户，他敢于这样做，这样对大家都有好处。

用户教育

用户教育对雷达的作用就象家庭安全、饮食和健康一样重要。但是，谁来做这项工作呢？需要的是切实的工作而不是夸夸其谈的高谈宏论。作为专业人员，我们今天应当有把握给用户提供服务，而不当江湖骗子式的推销商。在用户选择和规定雷达的功能时，我们可以给予帮助，使其满足系统要求，雷达的工作环境应当以现实主义的方式加以规定，雷达性能的量度应当定量地加以选择和规定。还应当讨论有关可靠性、成本、可生产性和切合实际性等的问题。

如果对这些问题有普遍的解决方法的话，那么大概不外乎以下几条：给那些不准备投产的技术开发项目以适当的投資；在生产不那么“最佳”的系统的同时规划好产品的改进计划，以便在技术和资金条件成熟时提高这些产品；更完善地进行系统和威胁度分析以确定实际的环境条件和工作条件；以及对于产品开发计划应严格地而不是随便地应用那些当今所推崇的新技术来制定技术条件。

最后，我们可以找到近年来硬件和系统成功开发的实例，看看它们是怎样避免掉雷达开发方面常见的难题。衡量是否成功的尺度之一是设备的重复生产性（不管是否需要作重大改进）。我们可以而且应当根据用户教育的标准对本次会议上所提供的材料作一番评价。这些材料是否能直接地或者是通过中间工程阶段的教育而对用户有所裨益，使其将所得的产品应用于解决实际问题？有没有考虑所用方法的局限性和优点（或者是我们自认为没

（下转第14页）

防空用双基地雷达*

M R B Dunsmore

引言

在包括敌机入侵的任何潜在的未来冲突中,警戒雷达需要对抗各种干扰,特别是阻塞式干扰、欺骗干扰、金属片干扰、反辐射导弹以及潜入的飞机。在双基地雷达中,被动隐蔽的接收系统使得受到所有各种形式的直接攻击的弱点成为不存在了,至少是显著地减少了。高脉冲重复频率能提供多卜勒测量能力,以便从金属片干扰中区别目标。而双基地雷达也降低了从物体形状设计上实现雷达截面积减小技术的有效性。当然,发射机仍是遭受直接攻击的薄弱环节,但双基地接收机可接收多个单基地雷达的目标照射,或者用它自己专用的移动式照射器。

得到这种抗干扰的好处所必须付出的代价是增加了技术上的复杂性。需要用相控阵天线来产生一组电扫描波束,它们能随由目标反射回来的回波方向的变化而移动;采用中等脉冲重复频率波形,几个这样的脉冲同时在天线视场之内。在理想情况,阵面也应提供波束或波束组合,它们能与由非压缩雷达脉冲所占据的方位宽度自适应地相匹配。

在接收机进行准确测量目标的模糊时延和多卜勒频移之前,它必须重新产生发射波形的频率和时间。所需要的精度和稳定度决定了锁定于原子频标的频率综合器,它提供频率和同步系统,以建立时间参考基准。由于在天线视场内同时有几个脉冲,就必须有同等数量的信号处理通道数,以防止目标数据的丢失。这些通道则必须解决由采用中等脉冲重复频率波形所带来的距离和速度模糊。

双基地雷达接收系统的方框图与图1相似,它的五个主要分系统如下:

(1) 相控阵天线

这种天线产生能复盖90度扇形的一组互相连接的波束。天线的每一通道配有低噪声和镜像抑制接收机,接到波束形成网络上。通过波束开关矩阵,合成后的波束连接到

(2) 信号处理器

这种处理器提供若干分开的数据分析通道。每一通道配有中频脉冲压缩滤波器,其后是复抽样的模数变换器,即I和Q处理器。随后的数据处理包括:快速付立叶变换、地物平均和门限检测、距离和速度解模糊以及大地误差的补偿。

(3) 站间同步和通信系统

这是双工器至发射机的数据传输线路,同时还有外部的时间基准,如劳兰C等,来重新产生发射脉冲的时间。数据传输线路也传送发射的波形参数和发射天线的指向。

* "Bistatic Radars for Air Defence", pp. 7—11 (楼宇希译)

(4) 系统控制计算机

系统控制器在操纵员的控制下负责接收系统的全部操作管理。其控制功能包括信号处理通道对天线波束的分配和目标跟踪等任务。

(5) 综合显示器

这种显示器将所有通道来的图形综合起来, 它们带来大地参数的信息、敌我识别器或二次监视雷达的响应以及其它次要的数据。

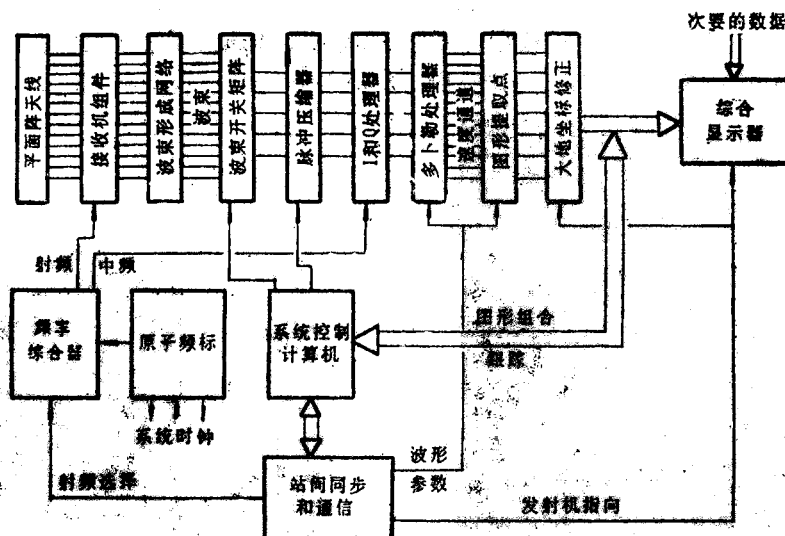


图 1: 典型的双基地雷达接收系统方框图

皇家信号和雷达研究院双基地雷达的规划

皇家信号和雷达研究院双基地雷达规划的主要目的是:

- (1) 研制双基地雷达所需要的设计和工艺技术的开发, 和
- (2) 目标截获、杂波和环境数据等知识的获得, 这些对双基地信号处理和双基地雷达性能评估是有用的。

以上第一个目的引出了一种模型样机的规划。在此规划中, 如图 1 所示的完整双基地接收系统正在制造。第二目的是在用飞机的现场试验时对数据进行记录和分析, 这工作正在进行中。

长期以来, 双基地雷达设计师们面对着犹如在空中平台上工作的复杂情况, 同时使用利用机会的*照射器。然而, 我们选择了首先开发最简单的双基地雷达型号, 对此是客观的需要。虽然如此, 在试图建造整个雷达前, 我们已研制和试验了关键的分系统。由于建造的是地面系统, 我们避免了在平台之间位置和运动数据变换的需要, 也避免了地杂波和平台引起的多卜勒频移的影响。当然, 这些问题是飞行的飞机所固有的。照射雷达最初选用皇家信号和雷达研究院的 BYSON 雷达, 但我们的目的是用 UKADGE 雷达 (或者是 Plessey 公司的

* 指不是专用的。例如在飞行试验时利用过航的飞机等——译注。

AR320), 以及研制我们自己独立的移动式照射器。

作为整个双基地接收系统设计的前奏, 皇家信号和雷达研究院主持了以下的研制工作:

BEARS—双基地实验阵接收系统

这是相控阵天线, 它的方位宽度和波束数约为计划中全尺寸天线的 $1/3$ 。BEARS 天线如图 2 所示, 它的模拟的波束形成技术如 Wallington 所描述^[1]。由皇家信号和雷达研究院和马可尼雷达系统公司联合研制。

RABIES—距离模糊双基地实验系统

这是计划的信号处理器的一个通道, 加上站间同步和通信系统。架设在试验车厢内的 RABIES 系统如图 3 所示。由 Plessey 研究所 (Roke Manor) 按合同研制。

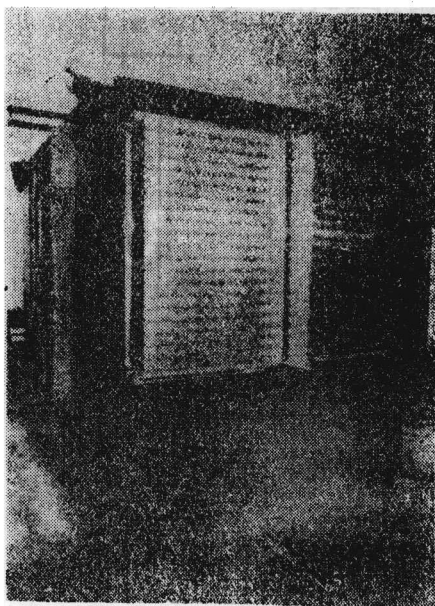


图 2 没有天线罩的双基地实验阵接收系统的天线

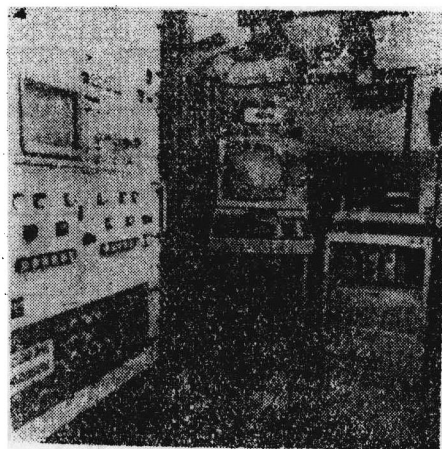


图 3 在试验车厢内的距离模糊双基地实验系统的处理器

这些最初的简单系统是这样设计的: 它们在将来可以改进; 同时当任何部分损坏时, 性能虽然下降, 但仍工作可靠, 保持了它们较简单的功能。三个典型的事例如下:

(1) 最初的相控阵天线采用电阻性波束形成网络, 带有向量调制器的激励放大器放置在它的前面。这些调制器是接收机通道调整所需要的, 用以补偿在阵面和 I 与 Q 处理器间对频率灵敏的各种影响。但是, 它们也提供了调制范围, 这是宽度和方向可控制的单一波束的模拟形成所需要的。

(2) 最初的脉冲压缩滤波器采用表声波色散延迟线。后来的系统可能采用相移键控调制的各种序列, 在接收机中的处理是自适应地与发射波形相匹配。可是, 我们打算仍采用表声波脉冲压缩滤波器, 虽然这需要专用的照射器以保持与超声波脉冲展宽器相匹配。

(3) RABIES 系统与复杂的站间同步系统一同工作, 后者最初依靠劳兰 C (如 Bovey 和 Horne 所描述^[2]), 后来的系统采用其它的精密定时信号, 如导航星。可是, 我们也主持了

简单的同步系统可靠性的研究,这种系统利用对流层散射的直接穿过信号,或从利用机会的目标反射信号(如Soame和Gould所描述^[3])。

BEARS天线已达到了双基地工作所需要的微波指标,而RABIES已成功地对模拟的和真实的目标进行了试验。BEARS和RABIES也已组合成一个单一电扫描阶跃波束的双基地接收系统,并对双基地距离为几百公里的目标进行了观察。

初期的双基地雷达试验

为了进行RABIES的现场试验,整个系统安装在改装过的AA4MKⅦ雷达车厢内,后者只保留了它原有设备中的单波束反射器和旋转齿轮箱。RABIES最初架设在Cotswolds英国皇家空军的基地(在皇家信号和雷达研究院以南45公里),在那里观察清晰背景中的目标。后来移到英国东海岸的另一地点,观察在金属片和积极干扰背景下的目标。在每一情况,都用皇家信号和雷达研究院的BYSON雷达作目标照射。它可以提供4.6或45微秒相参脉冲序列,频率捷变在E/F频段超过12%,脉冲重复频率捷变高到4千赫,并有2兆赫的调频脉冲压缩。详情可参看Lappage等人的报告^[4]。虽然BYSON是一种正常转速为5转/分的警戒雷达,在大部分RABIES试验中它工作在跟踪状态,以便连续照射目标。目标的方位由英国民航局提供的二次监视雷达的数据决定。目标方位传送到RABIES车厢内,所以它的天线也能跟踪目标。这样的跟踪技术可使在事后离线分析时目标数据得到最大限度的利用,而扫描照射器对每一目标所提供的数据,典型地说只有0.1—0.2%时间,抽样之间的空隙约有10—15秒。

RABIES的目标包括试验专用的Canberras机和在英国主要航线上的各种民航机。此外,我们研究了从发射机至接收机间通过对流层散射直接穿透信号,飞机穿过基线时的前向散射信号以及各种形式的体杂波。进行了共极化和交叉极化的测量,因为BYSON雷达可以产生垂直和圆极化,而AA4MKⅦ和BEARS天线则分别为垂直和水平极化。

试验时至RABIES处理器的目标数据,在输入端用28线高密度数字记录器(HDDR)记录下来。同相和正交分量以2兆赫的速率同时记录,相当于压缩后雷达脉冲宽度为0.5微秒,每一抽样的分辨率为12比特,提供的动态范围为70分贝。这记录器的能力使飞机的航程能最大限度地加以利用,也可减少由于RABIES故障(实际未发生过)而引起试验数据的任何损失。每一次试验时间内,射频和脉冲重复频率序列和快速付立叶变换长度必须加以规定。但是记录可以通过RABIES处理器重复运行,来研究任一其它控制参数装定的改变所引起的影响。这些装定的参数包括检测门限和用于背景平均处理的数据扩散。记录的可用性也意味着我们对数据的分析不受在飞行试验期间所用信号处理硬件的限制。皇家信号和雷达研究院计算机的分析能模拟RABIES硬件,但它更灵活,能改变像快速付立叶变换加权那样更多一些的参数。

试验记录的分析

因为深信硬件结果的正确,对HDDR磁带上数据的分析通过RABIES硬件的软件模拟,

从试验数据运行开始。然而,这种计算机评估的主要目的是导出波形设计信息,这些从 RABIES 的硬件中是无法得到的。

虽然 RABIES 也具有低脉冲重复频率的工作能力,但主要工作于中等脉冲重复频率。它依赖于距离模糊的分辨来区分出天线视场内的各个目标。它获得非模糊速度估计,以辅助其后的目标跟踪处理。距离和速度模糊用脉冲重复频率捷变来解出,在每一序列中捷变范围可以高达 6 倍脉冲重复频率。这些脉冲重复频率序列由 Aldous 所设计^[5]。它允许在序列中任意 2 倍脉冲重复频率捷变时进行目标观察,就能在给定的速度范围内解出非模糊的多卜勒频率。甚至当目标的回波散布在多到 ± 3 个连续距离单元中,它也能解出非模糊距离。在固定的射频和脉冲重复频率时,每一相参的脉冲组必须足够长,以保证在最大设计距离上的目标也有足够的回波数,以满足为得到必要精度所需要的快速付立叶变换的长度。

从 N 个连续脉冲重复频率的脉冲组之一所产生的完整回波序列可以重复产生,直到它扩展到一定的距离单元数目,即相应于所需要的无模糊双基地距离。于是, RABIES 处理器沿着这些距离单元扫描,同时注视这 N 个脉冲重复频率脉冲组中的回波。当 M 个或更多的脉冲重复频率脉冲组同时出现信号超过预先给定的门限时,就宣布有目标。在试验期间 N 的值是固定的,并且必须使 $2 \leq N \leq 6$; 而 M 的值在重放时可由 RABIES 的操纵员确定,其范围在 $2 \leq M \leq \min(N, 4)$ 。这时,他也规定背景噪声平均和检测门限的参数。

我们的数据分析包括以下的评价:

(1) 作为门限电平和 N 个中取 M 个的检测准则的函数,对发现概率和虚警率的评价。

目标位置可由在试验中记录下来的二次监视雷达数据知道——它们也可从发射和接收天线的指向推导出来,不过精度略差些。天线指向保存在 HDDR 磁带的标题中。当计算机沿着 N 组不重叠的距离单元扫描时,形成不同的和值:在无目标的位置 $1, 2, \dots, N$ 假目标同时出现之和,在已知目标的位置 $0, 1, \dots, N$ 真目标同时出现之和。从这些数据的直方图中我们可以作出发现概率和虚警率的评价,它们成为门限电平的函数(对于不同的 N 个中取 M 个的检测准则)。

(2) 对不同型号飞机回波的距离和多卜勒展宽的测量。

当目标从这个距离单元跨到另一单元时,可预计到目标在两个距离单元出现,进一步展宽也可能产生,例如由脉冲压缩滤波器,特别是当目标有较大的多卜勒频移时。关于目标距离和多卜勒最大展宽的了解有助于决定将来可用的波形式样。它在无重叠的距离模糊中不出现危险的假图形。

(3) 通过跟踪目标回波试验,导出双基地目标截面积和双基地角的统计学关系。

这一统计关系从系统工作频段范围内收集起来,还包括当目标穿过基线时的前向散射情况。双基地目标截面积对飞机视角的相关性是不严密的,因为大气扰动意味着飞机的轴不一定必然位于它的飞行路线上。最佳检测准则与每一种飞机的目标截面积的统计特性有关,检测门限必须调整到与目标的双基地距离相匹配。REBIES 和以后的雷达所用的频率捷变能防止直接的敏感的干扰;它也有希望减少在所有脉冲重复频率同时出现目标回波衰落的概率。除了提供双基地目标截面积统计特性外,这种分析还指出了频率阶跃序列能减小目标衰落的程度。

(4) 对雨、雪和其它形式体目标,双基地目标截面积密度和多卜勒特性的估计的推导。

在对双基地和单基地结果比较的帮助下,我们研制了分别的系统来记录从任何E/F频段单基地雷达来的经过校准的雷达数据。这种单基地雷达可工作在与BYSON相同的频率,也能在我们所试验的航路区域进行观察。在试验中,对BYSON、REBIES和所用的其它雷达的直接校准,可用飞艇曳的校准球来实现,如Reader等的报告所述^[6]。当RABIES工作时,数据记录在HDDR磁带上,并在皇家信号和雷达研究院加以处理,作出目标截面积密度或降雨率的彩色编码图。

(5) 由对流层散射造成的发射机和接收机间直接穿透信号的延时和幅度起伏的统计特性的推导。

这些测量指出了利用直接穿透的可行性,它可作为接收机与发射机同步的一种方法。在这些试验中,REBIES常用的站间同步和通信系统用来作为基准。

双基波雷达的未来发展

皇家信号和雷达研究院的双基地雷达接收系统正在与UKADGE单基地雷达进行联合试验。然而,将来我们的目的在于减少它对任何这类系统的依赖性,特别是当这类系统中的雷达在它们的设计要求中不包括双基地雷达操作最佳化时。与任何可利用的频段一致的雷达工作是一种选择,我们对依靠直接穿透和从已知位置的目标反射这样两种同步方案的开发有助于这种选择。可是,接收机不能重新产生发射波形和天线指向,除非它们遵循着某种可预测的序列。射频和脉冲重复频率捷变会使需要相参脉冲序列的任何处理失效,而相控阵雷达可望采用扫描序列,它能自适应于它们所观察目标的环境,而不是跟随任何有规律的扫描图形。

另一方面,双基地接收系统可与它自己专用的照射器一起工作。由于发射机和接收机的分开使得不需要接收机在发射时关闭,这种照射器能采用高工作比的波形,或者甚至是像伪随机相移键控那样的连续调制,所以达到低的截获概率。几个照射器同时或轮换使用能增强抗干扰能力。因为目标的双基地距离可以比它的角度更精确地测定,它也能提供更高的目标位置精度。

未来的双基地接收系统有希望采用数字脉冲压缩和数字波束形成,如Wardrop所描述^[7],但不必等到它们的计算费用降低和它们的速度和带宽增加。在理想的情况,雷达仍保持它的现有的无源超声波脉冲压缩器和电阻性波束形成网络,当接收机出故障时应用。数字脉冲压缩的灵活性使双基地接收系统能自适应地选用照射器,而这些照射器的波形并不一定要专为它的需要所准备。数字波束形成在调配扫描波束方面有二个优点:(1)当发射脉冲穿过接收天线的视场传播时,波束的宽度可自适应地与发射脉冲的方位宽度相匹配;(2)它们的副瓣在已知有干扰发射机的方向为零。

极化捷变能产生引人注意的结果,即它能增大双基地雷达的信干比或信杂比。然而,据Foster的研究结果指出^[8],极化捷变最好是在照射器的反射器天线,而不是在双基地接收系统的相控阵。对金属片干扰,假设它们在整个立体角内是均匀分布的,Mack和Reiffen^[9]已估计了在双基地工作时所观察到的金属片目标截面积密度。当发射和接收的极化相正交时,双基地角为 0° 和 90° 时的目标截面积密度比单基地共极化时要低4.8和5.5分贝。若两者的

极化都在入射平面内,在双基地角为 90° 时下降达到最大,为6分贝;若两者均垂直于入射平面,则双基地工作不下降。我们对试验结果的分析指出,还不能断定实际上这种下降是否存在。他们也指出,由于空中目标的双基地目标截面积在共极化和交叉极化时的下降,金属片的双基地目标截面积下降能否得到抵消也还难断定。

参 考 文 献

- [1] Wallington, J. R. R., 1985, "The Role of Analogue Beamforming in Radar", GEC Journal of Research, 3, 25-33.
- [2] Horne, C. P., and Bovey, C. K., 1987, "Synchronisation for Bistatic Air Defence Radars", Radar 87 Conference proceedings.
- [3] Soame, T. A., and Gould, D. N., 1987, "A Description of an Experimental Bistatic Radar System", Radar 87 Conference proceedings.
- [4] Lappage, R., Clarke J., Palmer G. W. R., and Huizing A. G., 1987, "The BYSON Research Radar", Radar 87 Conference Proceedings.
- [5] Aldous R. G., private communication.
- [6] Reader, K. N., Clarke, J., and Lappage, R., 1987, "New Calibration Method for Pulse-Doppler and MTI Radars", Radar 87 Conference Proceedings.
- [7] Wardrop, B., 1985, "The Role of Digital Processing in Radar Beamforming", GEC Journal of Research, 3, 34-45.
- [8] Foster, P. R., private communication.
- [9] Mack, C.L., and Reiffen, B., 1964, "RF Characteristics of Thin Dipoles," Proc IEEE, 52, 533-542.

(上接第7页)

有任何局限性)?是否提出了问题,或者仅仅是提出了一种漫无目的的研究?技术是否针对用户需要,或者用户(以及他的预算)只是技术的奴隶?如果我们对这些问题的扪心自问,有个满意的回答,我们就尽到了工程师的职责,成为本学会认真负责的会员。

参 考 文 献

- [1] H. E. Schrank, "Low sidelobe phased array antenna," IEEE Ant. and Prop. Society Newsletter, April 1983, pp. 5-9.
- [2] E. Carlsson et, "Search radar reflector antennas with extremely low sidelobes", Conf. Proc. Military Microwaves, 1982, pp. 500-505.
- [3] H. E. Schrank, "Low sidelobe reflector antennas", IEEE Ant and Prop. Society Newsletter, April 1985. pp. 5-16.

实验性双基地雷达系统*

T.A. Soame D.M. Gould

引言

本文介绍由马可尼研究中心代表马可尼雷达系统公司在最近进行的一项研究工作，双基地雷达的设计、建造和运用。这一雷达的各组成部分位于超地平线的基线上，工作在E/F频段。发射机采用皇家信号和雷达研究院的BYSON雷达，架设于英国的Malvern。接收机位于英国的Chelmsford，相距200公里。此雷达是作为将来进行这项和其它题目研究的试验基地而建造的。接收机是一个实验系统，采用相控阵天线，数字波束形成器，可改变结构的信号处理器，栅式图形显示器。双基地系统可工作于定点和脉冲追捕(Pulse chasing)两种

工作方式；为了没有距离模糊，雷达用中脉冲重复频率。

在多基地系统中配置雷达的优点是由于它具有这样的能力：可工作在较高的脉冲重复频率而无模糊；对定向性干扰具有较强的抗干扰能力；当发射机照射到杂波背景时，能在杂波背景中发现目标。这类系统的主要问题是信号处理的要求与单基地雷达比起来显得十分复杂，需要有能改变结构的信号处理器，以便在数据截获期间可重编程序。另一主要绊脚石是需要发射机和接收机间同步，这一点在移动式系统中十分突出。为了截获信号，脉冲向空中发射的时间、发射方位、站间的几何位置必须让接收系统知道。所以这种系统的工作是十分复杂的。一旦这些信息知道后，如果脉冲串间是相参的，就可提取距离信息和完成多卜勒滤波。

这种体制的威力图和单基地雷达不一样，我们熟悉的等距离的同心圆

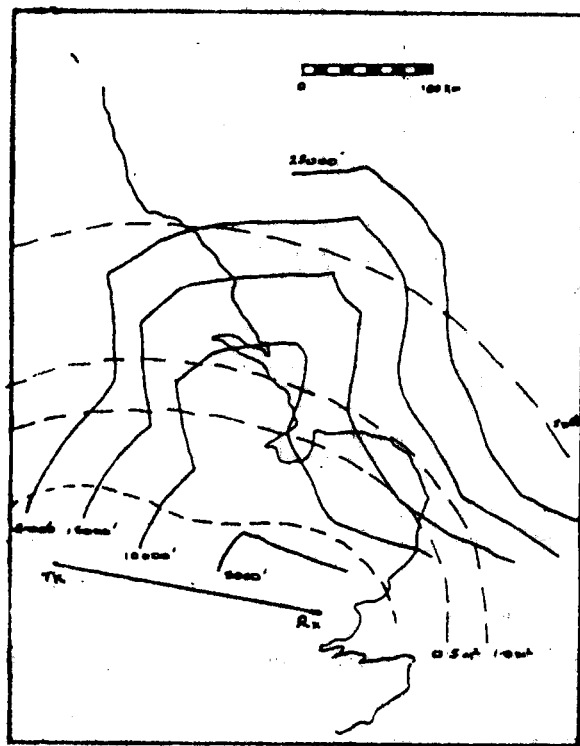


图1 雷达威力区

*"Description of an Experimental Bistatic Radar System", pp. 12—16 (楼宇希译)

在这里用等时延的双曲线代替,如Tackson所描述^[1](图1)。这些曲线的焦点在英国的Chelmsfold和Malvern。曲线所指的“距离”表示等时延,若没有发射方位的信息,它仍是模糊的。本系统对民航机的发现距离约为400公里(一个往返)。由地球曲率所引起的限制也示于图中,表示为垂直面上的威力图。图中也表示了系统公共的威力区,可看出有相当大的无用时间,当灵活性的特点被发挥出来时,这常是我们所配置的系统的一个优点。相控阵做接收用,各单元的输出直接作为数字波束形成器的输入,它能形成六个按照所需加权的波束。雷达是按六个波束设计的,但这里介绍的只有一个波束。当考虑到系统工作在脉冲追捕方式时,这是重要的。波束转动方法考虑了双基地雷达的结构,保证滞留时间和随后为多卜勒处理所需的积累周期与发射方位相一致。

本报告叙述接收系统的硬件,讨论工作模式和同步方法。最后一节指出系统将如何扩展,以获得波束自适应的更先进的双基地工作型号。

系统概述

系统总的方框图如图2所示。下文介绍接收系统的各部分,着重于主要特点。

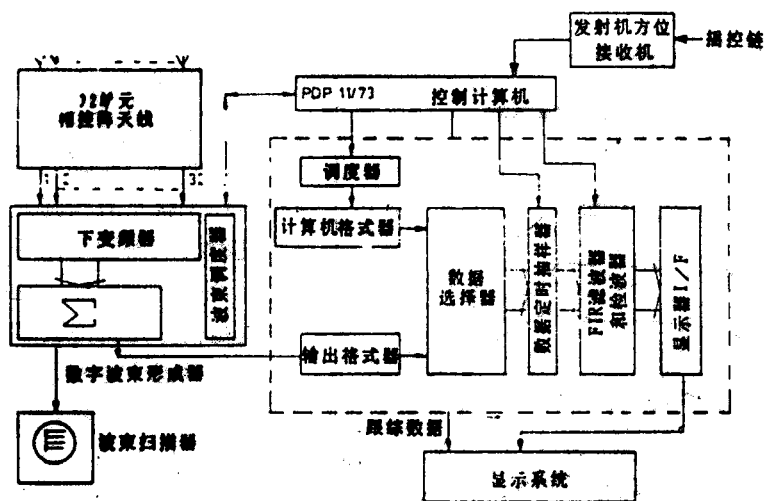


图2 双基地雷达接收机

发射方位通信线路

要计算目标的距离,某些参数是需要知道的,如发射机和接收机的指向以及基线距离。换一种情况,若单基地距离可以利用,则上述参数的任一个可以省掉。在本系统中,发射方位数据是由皇家信号和雷达研究院在Malvern的遥置数据发射机连续发送的,它连接到BYSON雷达轴角编码器的输出。这信息获得后,提取出的最低有效位用调制解调器通过英国电信标准电话线路送出。因为双基地系统的工作有一个很大的无用时间,即发射机和接收机不重合的时间,送一组完整周期的数据是不需要的。在复盖区开始和结束各送出一个扇形标志,