

有源相控阵天线阵面监测方法浅析

张 健 黎海林

(北京跟踪与通信技术研究所·北京·100094)

摘要 阐述了阵面监测系统在有源相控阵天线中的作用,给出了三种监测方式的原理及实现方法,比较了其优缺点,并对工程应用的前景进行了分析。

关键词 有源相控阵天线; 外监测法; 内监测法; 平面近场测量法

1 引言

近年来,随着空间目标探测与识别的发展以及各种飞行器性能的不断改进,对雷达的性能和电磁环境适应能力要求越来越高。固态有源相控阵雷达具有无惯性波束扫描、工作方式灵活、功率空间合成等特点,在远程预警、空间目标编目、电子对抗等方面具有传统抛物面天线雷达无法比拟的优点。由于单片微波集成电路(MMIC)、高性能数字信号处理器以及计算机技术的迅猛发展,目前固态有源相控阵雷达已成为雷达发展的一个热点领域。

有源相控阵天线特定波束形成及其无惯性扫描都是阵列单元幅度、相位及位置严格受控的结果。天线单元在加工安装过程中的误差、馈线电长度不等引起的相位误差等需要通过监测系统进行测试,然后通过调整更换可调的天馈线部件完成幅相误差的校准。在天线波束扫描时,在不同工作频率下,在不同的温度环境内,由天线单元之间的互耦、天线单元及馈线驻波引起的幅相误差等也需要阵面监测系统进行监测,再通过幅度调整元件和波控码修正实现阵列幅相调整。在长期使用过程中,有源器件难免产生性能下降或损坏,尤其对于大型有源相控阵雷达,阵面包括几千甚至几万个单元,有必要对各单元通道进行监测,以便及时调整乃至更换性能下降或失效的微波器件及控制部件,保证雷达高可靠工作。因此,大型固态有源相控阵雷达的阵面监测在雷达系统设计、研制与使用过程中具有十分重要的作用。图1、图2为有源相控阵雷达采用外监测方法测得的相位和幅度图,该雷达为一个包括5120个有源单元密度加权的有源相控阵雷达,图中用红到蓝不同的颜色表示不同的幅相值。从图中可以方便直观的看出失效或故障单元。

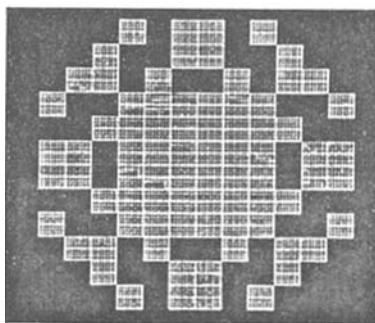


图1 外监测测得阵面 T/R 组件相位情况

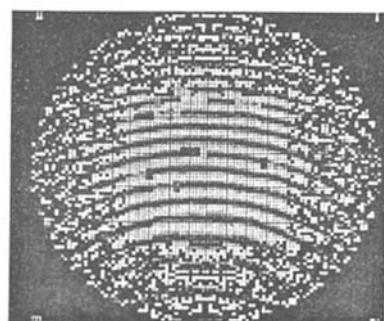


图2 外监测测得阵面 T/R 组件幅度情况

2 监测方法介绍

有源相控阵天线的阵面监测方法主要有三种：外监测法、内监测法和平面近场测量法^[1]。测量各天线单元通道之间的幅度和相位要求有测试信号源、监测馈线、幅相测试仪、控制设备以及记录显示装置等。根据测试信号源产生和放置的位置不同，监测方法可分为外监测和内监测两大类。采用外监测法时，测试信号源置于天线阵外，测试信号源既可以位于远场，也可以放在近场；采用内监测法时，监测信号源位于天线阵内。此时，监测信号源可以是雷达发射机，也可以是专用的测试信号源。

2.1 内监测法

内监测既可以做单元级内监测也可以做子阵级内监测，下面以子阵级内监测为例分别介绍发射内监测和接收内监测。

2.1.1 发射内监测

如图 3 所示，当子阵发射内监测时，由监测计算机控制雷达工作在发射内监测状态，信号由 N 路功率分配网络分配到子阵级 T/R，从子阵级 T/R 输出的主路（功率分配器前）预留的监测用定向耦合器耦合出信号送到 N 路监测矩阵开关，计算机控制矩阵开关选通要测的支路送到幅相接收机和测试仪，通过与在进入 N 路功率分配网络前耦合出的参考信号进行比较，测出每个支路信号的幅度和相位。

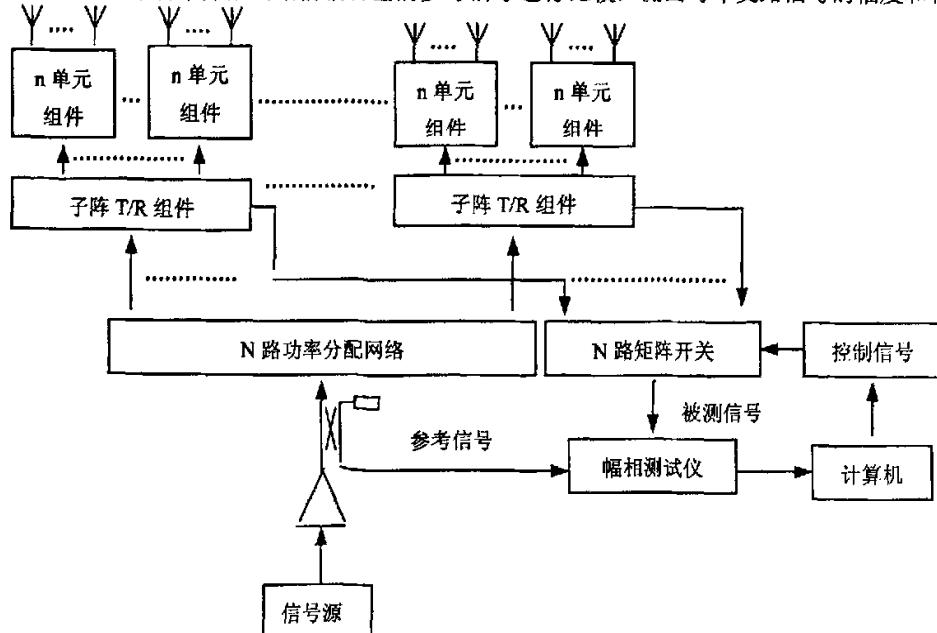


图 3 发射内监测系统框图

2.1.2 接收内监测

如图 4 所示，当子阵接收内监测时，由监测计算机控制雷达工作在接收内监测状态，信号由 N 路监测矩阵开关选通的支路（通过计算机选通要测的支路）输出，从子阵级 T/R 输出的主路（功率分配器前）预留的监测用定向耦合器注入信号，再通过波束形成网络去接收机的和、差通道用定向耦合器或者开关取出被测信号送幅相接收机和测试仪，通过与在进入 N 路矩阵开关前耦合出的参考信号进行

比较, 测出每个支路信号的幅度和相位。

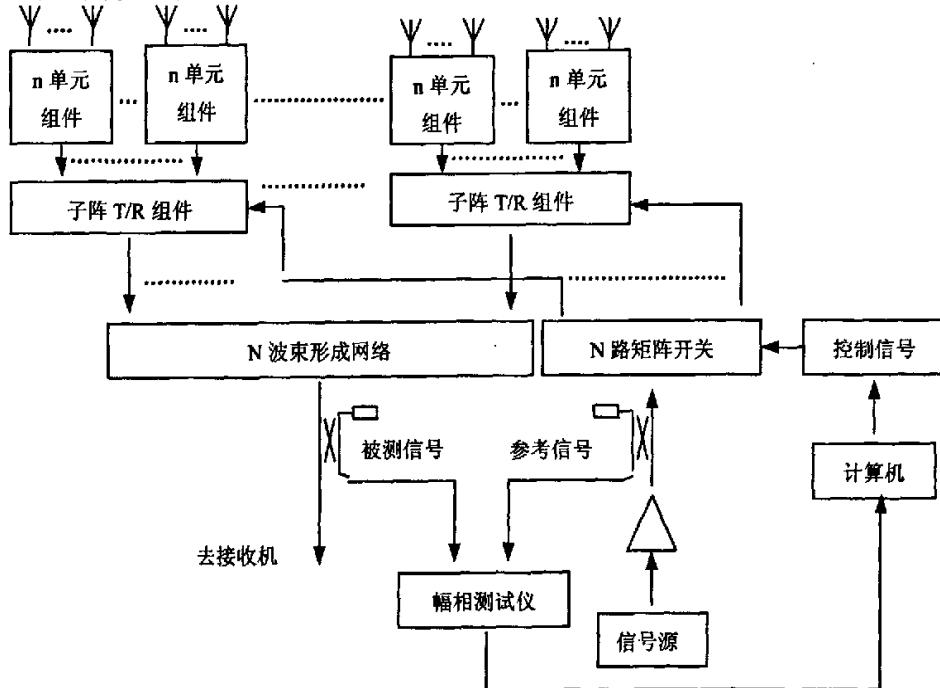


图 4 接收内监测系统框图

2.2 外监测法

如图 5 所示, 在相控阵天线外面设置一个辅助天线, 通过辅助天线接收阵面上被选通的被测单元的高频信号或阵面上被选通的被测单元接受辅助天线上发射的高频信号 (由监测计算机控制雷达工作在外监测状态, 并控制一系列外监测收发开关, 同时还可以控制 T/R 组件的移相器切换移相位), 依靠定时器协调同步将其送幅相测试仪, 与参考信号比较得到各通道的相对幅相数据^[2]。

2.2.1 辅助天线的位置及性能要求

外监测系统工作时, 天线单元接收到的外监测信号的最大与最小幅度差与辅助天线放置的高度有关。在满足辅助天线处于阵列各天线单元远区的条件下, 辅助天线放置高度高, 差值小; 一般情况下, 辅助天线辐射相同的功率时, 相控阵各天线单元接收监测信号的大小差别可达几十分贝, 因而对监测信号源的输出功率和幅相接收机动态范围提出了苛刻的要求; 对辅助天线安装架设姿态进行优化调整, 各天线单元接收监测信号幅度差可以缩小到几分贝; 另外由于极化失配会导致监测信号损失, 辅助天线的极化方式应和相控阵天线辐射器的极化方式相对应, 具有低副瓣电平的性能。

2.2.2 外监测测试方法

换相法 由监测计算机控制雷达工作在外监测状态, 给出一组阵面配相状态 (典型的如阵面等幅等相状态), 选择一个通道切换各种移相器状态, 测得多组幅相数据, 以此类推, 测得所有通道切换各种移相器状态的多组幅相数据。根据测得的数据建立线性方程组, 并利用移相器的先验信息解线性方程组得到相控阵天线的幅相分布。

逐路选通法 由监测计算机控制雷达工作在外监测状态, 按顺序 (也可随机) 选通一路相控阵通

道进行收发信号，其它通道接匹配负载（单元 T/R 组件里预留），测得该通道传输的幅相数据，以此类推，测得所有通道传输的幅相数据，解线性方程组获得各通道的激励复振幅，最终得到相控阵天线的幅相分布。

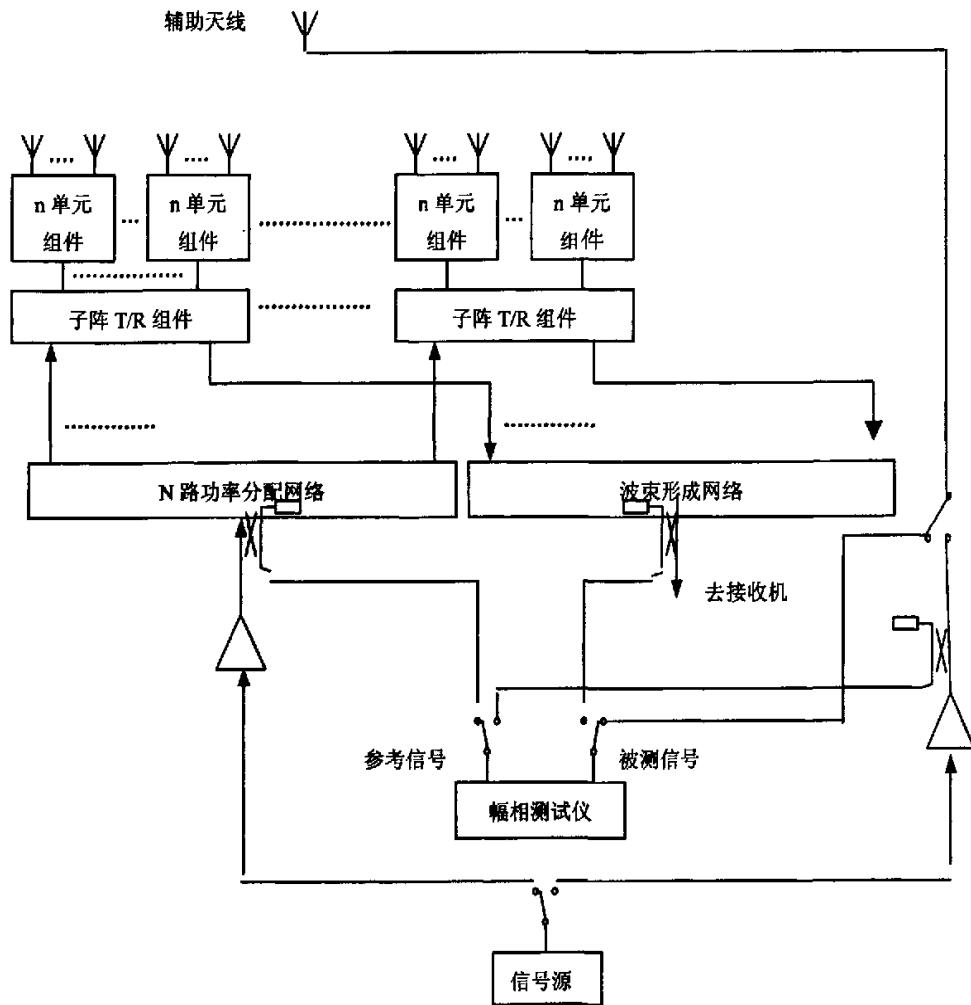


图 5 外监测系统框图

2.3 平面近场测量法

平面近场测量法又名扫描架法，它是通过测量天线阵的近场场强分布，反演出天线阵面各天线单元的电流分布，据此找出各天线单元之间的幅度与相位误差。在作了逻辑分析后，还可以找出馈线系统中各个不同级别的功率分配/相加网络之间的幅相误差与故障。相控阵天线的维修架用作水平方向按单元水平间距移动的扫描架（用伺服电机控制），水平方向移动范围比阵面大几个波长；架上安装在垂直方向按单元垂直间距移动的探头（手动控制可定位，距离被测天线 1~3 个波长），垂直方向移动范围比阵面大几个波长；探头采用和相控阵天线辐射器相同极化的探头，通过伺服驱动与波控机、测试设备（和内外监测共用）同步选通单个通道测出平面近场的幅相分布结果。

3 监测方法的比较及应用前景

3.1 优缺点比较

由于阵面监测以内外监测法为主，平面近场测量作为它们的补充，这里只对内外监测方法优缺点做比较。平面近场测量法与内监测法特点类似。

3.1.1 内监测

优点 ①技术成熟，可靠性高，性能稳定；②监测精度高，且容易校准；③可在雷达正常工作时工作，即可在线监测；④内监测设备都在室内，环境条件好。

缺点 ①监测结果不包括天线单元及其互耦作用，所监测到的幅相数据与实际值有一定差别；②测试信号是通过一个 N 路矩阵开关分配的，矩阵开关自身的误差也包括在内，因此要对矩阵开关提出严格的精度要求；③该方法需要一个专门的监测矩阵网络，有大量的矩阵开关及其驱动电路，还需要大量的电缆。因此系统复杂，设备量大，成本高；④对于高频段相控阵雷达，阵面高频箱内空间有限，而内监测法却需要矩阵开关、电缆等大量的设备，使得阵面高频箱内空间非常拥挤，给阵面电磁兼容性设计和结构设计带来困难。

3.1.2 外监测

优点 ①考虑了天线单元及其互耦，监测到的幅相数据更接近真实值；②相对于内监测设备量大大减少，监测系统相对简单，易于实现；③由于减少了大量电缆、矩阵开关及其驱动电路，节省了阵面高频箱内的有限空间，降低了电磁兼容性设计和结构设计的难度。

缺点 ①监测精度相对较低，校准相对困难；②无法在雷达正常工作时进行监测，即不能在线监测；③环境适应性差。外监测辅助天线安装在室外的支撑塔上，在风速达到一定级别时，辅助天线产生一定固有频率、振幅的摆动，使得相位测试结果产生调制，从而无法得到准确的相位测试结果。

3.2 应用前景分析

三种监测方法各有优缺点，要根据天线精度、阵面规模、成本等具体要求确定采用哪种监测方法。内监测方法由于系统设备量大、精度高，一般应用于小面阵和精度要求高的有源相控阵雷达；而外监测方法由于系统相对简单但精度较低，一般应用于精度要求不高或者单元较多的大型有源相控阵雷达；平面近场测量法精度高，但是对环境和设备的要求也高，一般应用于小面阵和对精度要求很高的有源相控阵雷达，并作为内外监测的补充。对大型有源阵，由于内监测网络需要大量的电缆、矩阵开关及其驱动电路，单元级内监测设备量太大，所以在精度允许的情况下，大型有源相控阵雷达一般采用外监测方法为主，并以子阵级内监测作为辅助。而对于精度要很高的有源阵则要求单元级内监测。

4 结束语

完善的阵面监测系统对缩短有源相控阵雷达调试周期、阵面单元幅相补偿或维修等起着非常重要的作用。本文介绍了阵面监测常用的三种方法，具体工程应用时，应根据雷达阵面实际情况进行选择。

参考文献

- 1 张光义. 相控阵雷达系统. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- 2 吴祖权. 有源相控阵雷达阵面监测方法及其实验研究. 现代雷达, 1998, (5):1-7.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>