

有限扫描固态相控阵天线

匡 勇 于春国 聂晓初 周 卫 郭 林

(航天科工集团二院 23 所, 北京,100854)

摘要: 本文介绍了一部大型有限扫描固态相控阵天线, 其中包括天线的设计方案、设计方法和理论分析方法, 此天线具有固态有源、高效率、高增益、瞬时宽频带及和差波束精密跟踪等特点, 另外还要求适于宽带成像、多目标精密跟踪和测量。作者在天线总体设计中, 采用有限扫描相控阵天线设计技术, 单元间距采用 1.42λ 。通过试验测试表明天线在 10% 的频带范围内满足了在扫描 $\pm 10^\circ$ 范围内天线增益下降小于 1dB 和栅瓣抑制到 -20dB 左右的要求。由于采用有限扫描相控阵天线设计技术, 单元间距是常规相控阵天线的 1.58 倍, 即 T/R 模块数量是常规相控阵天线的 40% , 从而大大降低了天线的成本。

关键词: 相控阵天线、有限扫描、T/R 模块, 固态阵。

A limited scan solid state phased array antenna

Kuang Yong Yu Chunguo Nie Xiaochu Zhou Wei Guo Lin

(Institute 23, the Second Academy of China Aerospace Science and Industry Corp., Beijing 100854, China)

Abstract: This paper presents a limited scan solid state phased array antenna, including its design and analysis. The antenna is solid state, high efficiency, high gain, instantaneous wideband and sum-diff beam tracking precisely. This antenna is applied to radar of the wideband imaging, multi-objective tracking and measurement. When the element spacing is 1.42λ and the scan angle is $\pm 10^\circ$, the grating lobe is about -20dB and the gain decrease versus the scan angle is less than 1dB .

1 引言

相控阵天线是由许多单元构成的, 对于有源(有微波放大)相控阵天线来说, 微波信号是在阵面上产生或由阵下产生在阵面进行功率放大并移相, 再在自由空间指定空域形成要求的波束。一般情况下, 天线单元(可独立控制相位的单元)越多则天线成本越高, 而天线单元的数量主要决定于天线增益和天线的扫描范围, 天线增益越高则天线单元数越多, 扫描角越宽, 则天线单元数也越多, 因此如何保证天线增益和扫描范围满足技术指标要求情况下, 天线单元数最少是相控阵天线优化设计的目标之一。一般情况下, 无源相控阵天线来说移相器及控制是非常关键的, 主要成本发生在移相器及控制部分, 因此减少移相器和控制部分的数量是非常关键的。而有源相控阵天线的核心器件是 T/R 模块

(含移相器) 及其控制, 因此对于有源相控阵天线来说, 要降低成本, 就必须减少 T/R 模块的数量。

相控阵天线根据扫描范围可以分为宽角扫描、有限扫描和一般扫描, 不同的扫描范围有不同的设计方法和重点优化的目标。对于有限扫描相控阵天线, 减少天线单元是很主要的目标, 而且由于是有有限扫描相控阵天线, 可以采用有限扫描相控阵天线设计技术减少单元数。

2 天线的设计

2.1 天线的组成及工作原理

具有收发功能的固态阵天线, 包括: 辐射单元、T/R 模块、T/R 模块控制电路、馈电网络、T/R 模块功率驱动器、环形器、阵面综合布线(包括控

制线、数据线、监测线、电源线)、天线罩等。

在发射状态下其工作原理为：由频综送出的微波信号通过传输线到天线系统，由 T/R 模块发射通道输出的微波功率通过环形器给天线单元馈电，再由天线单元向空间辐射，在指定空域形成要求的波束。每个单元输出的微波信号的相位是由功率放大器前的移相器实现的，即由放大器的激励信号确定，通过波控机控制移相器的移相可以实现天线波束在要求的空域内快速切换，实现天线的电扫描。

在接收状态下其工作原理为：天线单元收到的微波信号通过环形器后送到 T/R 模块的接收支路，经过 T/R 模块的低噪声放大器放大并移相后传给功率合成网络合成，最后由和差器形成和波束、方位差波束及俯仰差波束；同发射状态一样，在波控机的控制下，天线能将波束在要求的空域内快速切换，实现天线的电扫描。

2.2 天线设计

2.2.1 天线单元排列及间距的优化设计

在相控阵天线中，扫描范围是一个非常重要的技术指标，一般来说，扫描范围大，天线单元数多，成本高。而扫描范围小，天线单元数少，成本低。在系统设计中，需要综合平衡，确定天线的电扫描范围，而在天线的设计中，根据系统要求的电扫描范围确定天线的间距和单元数量。

在常规情况下,单元按矩形栅格排列时,其单元间距见式(1)。

$$d \geq \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_m} \dots \dots \dots \quad (1)$$

式中: d 为单元间中, λ 为波长, θ_m 为最大扫描角。

当扫描角较大时，一般称为宽角扫描，比如说扫描范围大于 $\pm 45^\circ$ 范围时称为宽角扫描。当扫描范围较小时，称为有限扫描相控阵，一般来说，有限扫描相控阵天线的扫描范围不大于 $\pm 10^\circ$ 的范围，个别情况为 $\pm 20^\circ$ ，实际上，若以有限扫描天线设计技术进行设计的相控阵天线的扫描范围在 $\pm 10^\circ$ 左右，天线的技术指标比较容易保证，而当扫描角大于 $\pm 15^\circ$ 时，要保证较好的技术指标难度较大。

有限扫描相控阵天线有两种设计方法，一种是常规相控阵天线设计方法，即用式(1)设计单元间距，这种方法天线单元数多，成本高，重量大。另

一种方法是有限扫描相控阵天线的设计方法，通过优化设计，可以大大减少天线单元数，但这种天线有栅瓣存在，需要采取措施，抑制栅瓣。

本天线的扫描角为 $\pm 10^\circ$ ，按照常规相控阵天线的设计，若设计 2400mm 的圆阵，则天线单元数约为 4500 个。对于固态相控阵天线，则需要有 4500 个带有移相器的 T/R 模块，这不仅天线单元数多，天线的重量、结构设计和散热设计也有很大的困难。

采用有限扫描相控阵天线的设计方法，天线单元间距大于 1 个波长（约 1.4λ ），在扫描时，会出现栅瓣。根据相控阵天线的理论可知，栅瓣是无法消除的，只可以通过一定的措施，将栅瓣抑制，以满足雷达工作的需要。

2.2.2 有限扫描相控阵天线瓣抑制

抑制栅瓣的方法有两种，一种是采用优化设计的阵面排列方式，即通过合适的单元排列，将栅瓣的能量尽量分散，另一种是利用单元方向图，将栅瓣的能量抑制住。

本天线采用性能优良的天线单元，当天线扫描到 $\pm 10^\circ$ 时，可以将栅瓣抑制到-10dB，

为了进一步抑制栅瓣，进行了大量的分析计算，设计了多种不同的排列方式，通过优化设计和比较，最后确定了天线阵面的排列方式。采用这种优化设计的阵面排列方式，再结合具有栅瓣抑制能力的高效率辐射单元，可以保证天线在 $\pm 10^\circ$ 的扫描范围内，俯仰面不出现栅瓣，而在方位面栅瓣在-20dB左右。

2.2.3 天线总体布局

本天线是一部瞬时宽频带强迫馈电的固态相控阵，主要技术设计如下：由 4×4 个天线单元组成一个分子阵（有利于采用 4 单元组成一个组件），在方位面排列 12 列分子阵，在俯仰面排列 12 行分子阵，每个角切去 10 个分子阵，如图 1 所示。全阵共有 104 个分子阵，1664 个 T/R 模块和相应的高效率有限扫描辐射单元。

本天线要求瞬时带宽 800MHz，因此只可采用等长度馈电，为此采用等长度并馈强迫馈电。

口面分布的选择一般根据副瓣电平和天线效率来选择。口面分布锥削大，副瓣电平则较低，但此时天线口面利用效率也较低，因此在口面分布选择时，需要根据副瓣电平和天线口面利用效率的要求来进行优化设计。

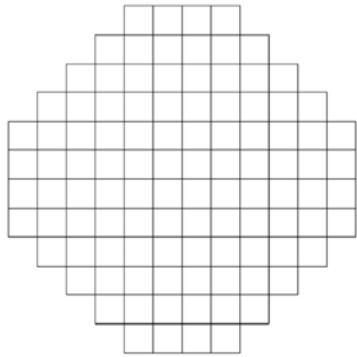


图 1 天线阵面分子阵布置（收阵）示意图

对于固态阵，发射模块工作于饱和方式，为了充分利用已有的功率，对于发射状态一般不进行幅度加权，因此对于发射状态一般选用均匀分布，本天线根据接收天线的副瓣电平要求进行口面分布的选择。通过优化设计，采用 TAYLOR 分布，对于 -25dB 的副瓣电平要求可以达到 90%以上的效率。

2.2.4 高效率辐射单元设计

本天线相扫描空域只有 $\pm 10^\circ$ ，属于有限扫描相控阵天线，天线单元间距较大，若采用一般的辐射单元通过单元方向图来抑制栅瓣的效果差，因此需要设计高效率高增益的辐射单元，即单元有阵中单元方向图扫描区域内比较平，而在扫描区域外则迅速下降，这样能有效抑制栅瓣。

在天线单元选型时必须选择阵中单元增益高的天线单元。即阵中单元的增益与其所占面积的增益相当。通过优化设计，采用高效率喇叭作为辐射单元，实现了单元间距为 1.4 个波长的高增益辐射单元。此天线工作频带大于 10%。天线单元阵中匹配驻波比性能如图 2 所示。

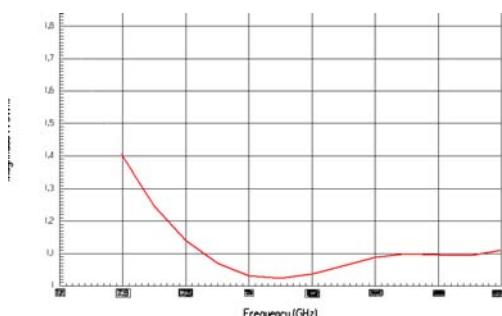


图 2 天线单元阵中匹配驻波比

2.2.5 强迫馈电网络设计

固态相控阵天线是由许多单元构成的，因此需

要将频综送来的微波能量分配到每个单元上去或将每个单元接收到的微波功率合后送到接收机。本天线采用强迫馈电，通过功率分配器或耦合器来实现。由于本天线要求瞬时带宽为 800MHz，因此馈电网络为等长度设计，这除了功率分配器的各端口为等电长度外，还要求所有的射频传输电缆为等长度。

2.2.6 T/R 模块简介

T/R 模块是本天线的关键部件之一，这种模块我所已经研制成功，T/R 模块的功能是实现固态阵天线微波信号的功率放大、低噪声放大、微波信号的移相等；它由发射通道、接收通道、公共通道及控制电路等部分组成。T/R 模块包括功率放大器、低噪声放大器、移相器、环行器、控制电路及电源等，由于采用有限扫描相控阵天线技术，天线单元间距大，T/R 模块可以采用由放大管直接构成微波功率放大器，而不需要用管芯组装而成，制造工艺简单，而且性能稳定。

2.2.7 波控机简介

波控机是该相控阵雷达中天馈系统的重要组成部分。它完成的主要任务是控制面阵天线的波束指向：即根据系统计算机发出的波束坐标，计算出每一个阵元所需的移相量，送至 T/R 模块中，对 T/R 模块中移相器的移相量进行控制，并进行各种补偿；检查 T/R 模块的工作情况，把检查结果回报给系统计算机。另外还完成对 T/R 模块工作波形的控制及 T/R 模块的检测。

3 理论分析与试验结果

3.1 理论分析结果

本天线要求：X 波段、瞬时频带宽度 10%，天线增益大于 44dBi，两维相控电扫描，扫描范围为方位和俯仰均为 $\pm 10^\circ$ ，并能形成发射波束、接收和通道、方位差通道、俯仰差通道等。

本天线采用有限扫描相控阵天线设计技术，天线单元间距大于 1 个波长（约 1.4λ ），在扫描时会出现栅。理论分析方位面扫描 10° 时方位面方向图如图 3 所示。俯仰面扫描 10° 时，俯仰面方向图如图 4 所示。

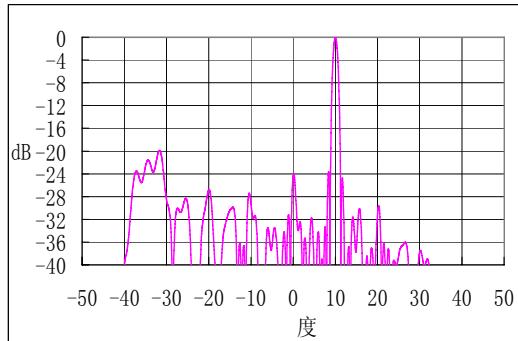


图3 扫描 10° 方位面方向图

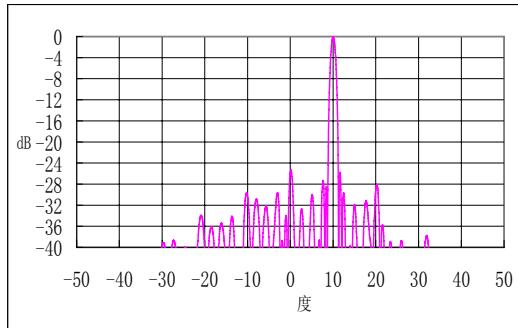


图4 扫描 10° 仰俯面方向图

从计算的方向图可知，当扫描至 10° 时，在 -33° 附近有约为 -20dB 的残余瓣瓣，在俯仰面扫描至 10° 时不出现瓣瓣，副瓣电平不大于 -25dB 。

3.2 试验结果及分析

对于固态相控阵天线来说，主要的测试项目有：天线的发射方向图、天线接收和方向图、天线接收差方向图，另外还有天线增益测试，天线指向精度的测试，天线增益随扫描角变化的测试，天线输入电压驻波比测试等。

天线典型的接收方向图（扫描 10° ）测试结果如图 5 所示。

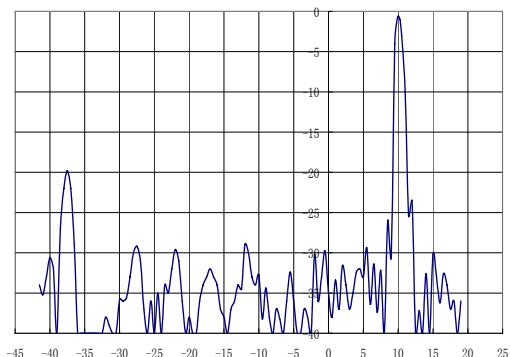


图5 天线扫描 10° 时的接收方向图

本天线的特点是采用有限扫描相控阵天线设计技术，因此天线的瓣瓣抑制能力是非常关键的，为此特意测试了扫描 10° 时大范围的方向图，如图 5 所示，从图中可见，天线的残余瓣瓣约为 -19dB ，达到了较理想的效果。

作为固态阵来说，天线增益是非常关键的技术指标，而天线增益的测试有较大的技术难度，对于发射天线增益的测试可以利用测试天线的辐射功率来测试，而接收天线的增益则通过方向性系数的测试再减去天线辐射单元的损耗及天线罩的损耗即可。

对于相控阵天线来说，不同的扫描角，天线增益有一定的变化，随着扫描角的增大，天线增益一般要下降。天线中心频率增益随扫描角变化测试结果如表 1 所示。

表 1

扫描角 ($^\circ$)	0	-6	-10
增益变化 (dB)	0	-0.3	-0.8
扫描角 ($^\circ$)	6	10	14
增益变化 (dB)	-0.3	-0.9	-3.5

由于本天线是有限扫描相控阵天线，单元间距为 1.42λ 。指标要求最大扫描角为 $\pm 10^\circ$ ，从表 3 可知，天线扫描到 14° 时，增益下降仅有 1.2B ，由此可见，本天线可以在 $\pm 14^\circ$ 的扫描空域内工作。如此优良的性能得益于采用了一种具有高效率的辐射单元。此辐射单元效率高、匹配性能好、可以抑制瓣瓣。

对于固态相控阵天线，高效率、宽频带匹配的辐射单元是非常关键的。本天线采用的高效率辐射单元（含同轴波导转换）的输入电压驻波比测试结果如图 6 所示。

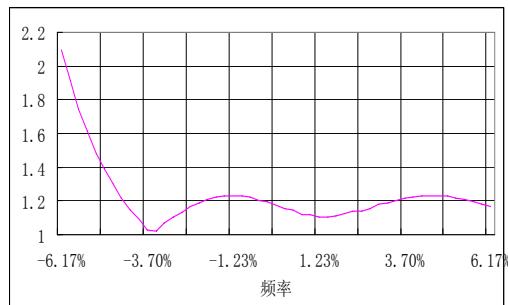


图6 辐射单元的输入电压驻波比测试结果

从图中可见，在 10% 的频带宽度范围内输入电压驻波比小于 1.23 。达到了良好的匹配。

4 小结

本文介绍了一部大型有限扫描固态相控阵天线。其中包括天线的设计方案、设计方法和理论分析方法及试验结果。天线具有高效率、高增益、瞬时宽频带及和差波束精密跟踪等特点。作者在天线总体设计中，采用有限扫描相控阵天线设计技术，单元间中采用 1.42 个波长，天线在 10% 的频带范围内满足了扫描 $\pm 10^\circ$ ，天线增益下降小于 1dB 的要求，栅瓣可以抑制到 -20dB 左右。由于单元间距是常规相控阵天线的 1.58 倍，即 T/R 模块数量是常规相控阵天线的 40%。

由于采用一种新的有限扫描天线设计技术设

计，不仅将栅瓣抑制到约 -20dB，而且保证扫描至 10° 时天线增益下降小于 1dB，在大部分情况下为 $0.7\text{dB} \sim 0.8\text{dB}$ 。从这两个技术指标来说，天线性能降低很少，只要精心设计，天线性能基本不降低。固态相控阵天线成本高，而栅瓣的抑制又不能在小阵上试验，因此必须在理论分析上下功夫，保证设计的正确性。本天线的理论分析结果与试验结果吻合相当好。

固态相控阵天线的研制是一项复杂的工程，涉及人员较多，不能一一列举，在此表示感谢。相控阵天线的研制涉及的设计内容较多，篇幅有限，只能将设计的一些经验作一些介绍，供大家参考，请批评指正。

参 考 文 献

- [1] 某型号天线技术设计报告 二十三所档案资料室 2005 年 11 月

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>