

星载雷达有源相控阵天线轻量化技术

张金平^{1,2} 李建新^{1,2}

(1 南京电子技术研究所, 南京 210039; 2 天线微波技术国防科技重点实验室, 南京 210013)

摘要: 轻量化是未来星载雷达有源相控阵天线的重要发展趋势。星载天线的轻量化, 既体现对在空间应用环境下的相控阵天线进行减重的直观要求, 也包含了对提高天线集成度、增强天线性能的深层目标。实现星载雷达相控阵天线的轻量化是一个复杂渐进的过程, 本文对其中涉及的相关技术问题进行了分析, 同时也探讨了问题解决的可能性。

关键词: 星载雷达, 有源相控阵天线, 轻量化技术

Light-Weighting Technologies for the Active Phased Array of Spaceborne Radar

Zhang Jin-Ping^{1,2} Li Jian-Xin^{1,2}

(1 Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

(2 National Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: Light weight is the necessary characteristic for the active phased array of spaceborne radar(APASR). The light-weighting technologies used for the APASR not only reduce the weight, but also improve the integration of array, which implies the higher array performance. Due to the complexity of the light-weighting process, the correlative technical problems are discussed firstly in this paper, and the possible solutions are also introduced.

Keywords: Spaceborne radar; Active Phased Array Antenna; light-weighting technology

1 引言

进入二十一世纪, 基于星载平台的雷达探测已成为军事侦察和战略预警的重要手段。随着应用需求的不断发展, 更多新型星载雷达的研制已提上日程^{[1][2]}。这些不同类型的星载雷达在分辨率、工作模式以及部署轨道高度方面都有更高的要求, 考虑到其基于卫星平台发射和在空间环境下应用的特性, 如何控制雷达载荷重量, 即实现雷达的轻量化成为研制过程中迫切需要解决的共性问题。

星载雷达的轻量化主要集中于对天线的轻量化。近年来, 有源相控阵天线由于具有波束灵活可控以及高可靠性的优势, 在星载雷达上的应用已日趋广泛, 其重量也通常占到整个雷达载荷重量的80%以上。未来星载雷达要有效完成高分辨率对地成像、快速动目标实时搜索跟踪等军事任务, 需要

具备更大口径和更强的电性能。在口径不断增大、电性能指标不断提高以至设备量越来越多的情况下, 如采用传统相控阵设计方法, 天线重量将呈现指数级的增长, 必然造成载荷重量及体积过大, 难以适应发射要求。此外, 为满足空间多星组网应用需要, 雷达的小型化、低成本也同样需要天线在保证性能的前提下解决轻量化的问题。

实现相控阵天线的轻量化, 不仅可为整个雷达系统的重量控制做出更大贡献, 同时由于天线在集成度方面的不断提高, 客观上也将对雷达性能的提升产生较大地推动作用。轻量化天线技术作为未来星载相控阵天线技术发展的主流方向, 涉及先进的设计思想、设计手段、材料、器件以及制造工艺, 涵盖有源相控阵天线技术的几乎全部方面, 已事实上成为当前该领域的研究重点。

2 技术趋势分析

星载有源相控阵天线现多用于星载合成孔径雷达，设计上均采用模块化设计^[3]，即将全阵划分为多个独立模块，模块内由沿距离向排列的辐射子阵（子阵内单元沿方位向排列）及配套设备构成：每个子阵接入独立的 T/R 组件，通过进行模块级别的分布式供电和控制，实现辐射子阵级别的幅度、相位独立控制，从而满足雷达提出的仅距离向一维波束扫描或准二维波束扫描要求。

从发展趋势来看，国外在星载雷达相控阵天线方面的发展已呈现出明显的轻量化态势。表 1 列出了若干近年来国外已发射或待发射的星载 SAR 相控阵天线的关键参数。从现有数据来看，较低频段

（指 L、C 波段）天线由于单个组件输出功率较大，T/R 组件数量相对较少，单位面积重量偏低，为 40kg/m² 左右；而对于 X 波段工作天线，组件输出功率低且数量大，天线则重得多。现已发射的 TerraSAR-X 平均重量在 100kg/m² 以上，预定在 2010 年发射的 Discover-II，工作于 X 波段，天线口径为 40m²，在组件数量达 2800 个的情况下，平均重量仅为 37.5kg/m²，可见该天线的设计在集成化、轻量化方面将有较大的突破。

尽管不同技术指标要求（包括天线口径、功率密度、工作带宽、扫描能力、极化方式等）直接影响天线设备量，从而导致天线在重量上的差异，但不论是以单位面积重量或单位功率孔径积重量来衡量，表 1 均显示星载雷达有源相控阵天线的重量控制水平正在不断提高。

表 1 国外星载雷达相控阵天线参数

型号	PALSAR	ASAR	RadarSAT-II	TerraSAR-X	Discover-II
工作频段	L	C	C	X	X
天线口径(m2)	8.9×3.1=27.6	10×1.3=13	15×1.37=20.55	4.784×0.754=3.60	8×5=40
扫描方式(方位/距离)	--/±20°	--/±15°	--/±20°	±0.75°/±19°	±1°/±20°
峰值功率(W)	2000	1395	5120	2304	1000
T/R 组件数量	80	320	512	384	2800
天线重量(kg)	500	690	750	394	1500
单位面积重量(kg/m ²)	18.2	53.1	36.5	109.1	37.5
单位功率孔径积重量 (kg/kWm ²)	9.06	38.06	7.13	47.37	37.5

2.2 天线设备组成与重量分布

基于对目前有源相控阵天线的重量组成分析，可为实现天线的进一步轻量化提供参考依据。传统形式的星载相控阵天线方案多为层叠结构，单机通过大量电缆进行连接。图 1 列举了一典型的星载 X 波段距离向一维相扫有源相控阵天线内部重量的分配情况，可大致说明现有相控阵天线设计方案中各部分的重量比例关系。由图中数据可知，按现有的天线设计方案，无源网络部分（高频馈电网络和低频电缆）总重量占到天线总重的 30% 以上，比例最大；其次为辐射天线，比例约占 2 成；结构框架、T/R 组件和供电控制设备重量也分别占 10% 以上。

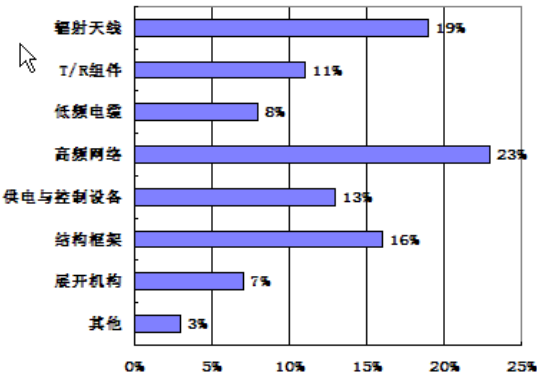


图 1 典型星载有源相控阵天线的重量分配

随着新型雷达对天线扫描范围要求的不断扩大（一维距离向扫描扩展到二维大角度扫描），直接使得天线子阵规模变小，天线形式将升级为近似全有源相控阵天线，此时天线所含 T/R 组件数量

将成倍增加，与其配套的高低频网络、供电和控制设备数量必然随之增长。根据现有天线的设计模式，此时天线内部 T/R 组件、高低频网络及供电和控制设备的重量比例将急剧上升，这将导致所设计的天线无论是在重量上还是体积上都无法适应空间应用需要。

可见，要实现天线的轻量化，就必须优先考虑对上述六部分尤其是 T/R 组件和网络部分的减重，其余部分如展开机构等所占重量比例相对较低，且设计相对独立，可独立进行研究。

3 轻量化技术措施与研究重点

3.1 新型系统方案

实现星载有源相控阵天线的轻量化，需要从具体的应用需求出发，采取由上而下的减重策略：即先从天线架构上进行突破，优化整体设计方案，再基于新的设计架构，发展相应的底层设计技术，最终实现对高性能天线的轻量化。

3.1.1 轻型低剖面方案

直观上看，将基于传统方案设计的各型单机直接进行对接，即可省去互连电缆，大幅降低电缆重量比重。而考虑到星载相控阵天线厚度受限，要实现单机的直接对接，势必引起天线分层方式的根本性变化，传统的单机独立设计结合电缆连接的实现方案，将由新型的单机分层布局结合盲插互连的低剖面设计方案替代，这一新型星载相控阵设计方案如图 2 所示。其重点在于实现 T/R 组件的小型化及对功分网络和电缆的进一步减重。

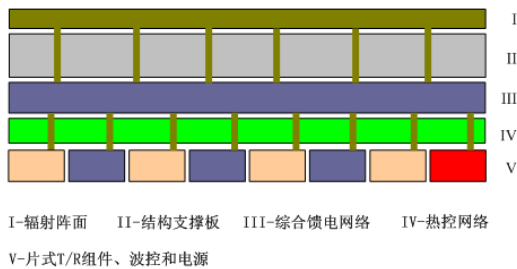


图 2 低剖面相控阵天线剖面结构示意图

从整体结构上来看，该方案天线由上而下可分为五个层面，依次为辐射阵面、结构支撑层、高集成馈电网络、热控层以及有源器件层（含组件、波

控和电源）。上述各层在保证性能指标满足的前提下，均设计为片式结构，通过结合盲插连接方式，进而减轻天线重量。整个天线模块的仅包含三种连接关系，即天线阵面、T/R 组件、电源和波控分别与一体化馈电网络盲插，从而实现无电缆式的相控阵天线模块设计。

通过采用新型的分层式低剖面方案，在二维大角度扫描要求下，天线内部各部分重量比例关系如图 3 所示，其中无源馈电网络的比例基本保持不变，T/R 组件重量比例上升。天线平均重量可基本保持一维扫描状态下的天线重量水平。

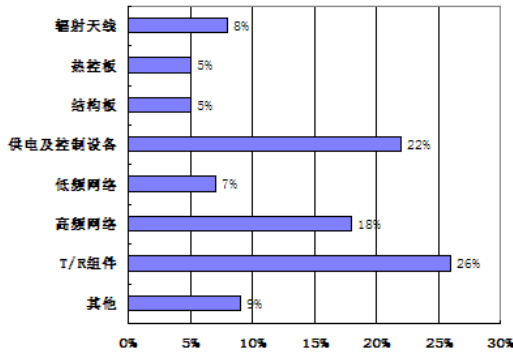


图 3 低剖面相控阵天线内部重量比例分配

3.1.2 薄膜相控阵天线方案

薄膜有源相控阵天线将用于满足未来星载雷达天线的轻型、可展开应用需求，尤其适用于大口径（几十至数百平方米）、低功率密度要求的应用场合，如天基预警雷达。薄膜式结构将给相控阵天线带来革命性的变化，这类大型柔性可展开天线为获得较轻天线重量和较小折叠体积，天线辐射阵面采用薄膜材料，展开框架则采用充气式柔性或刚柔结合支撑结构^[4]。

此型天线方案可在现有的平板式星载相控阵天线的基础上进行发展。

图 4 示意了采用孔径耦合微带天线的薄膜相控阵天线剖面结构，与现有的轻型板状天线结构相比，该型天线采用多层薄膜结构，利用周边张紧机构实现大型膜面的平整度控制。通过在薄膜阵面的各层集成先进的轻型柔性 T/R 组件、高集成馈网、轻型电源及波控，并配以柔性或刚柔混合式展开机构，薄膜相控阵天线不仅有望把天线平均重量降至 10kg/m^2 以下，同时也将极大地推动相控阵天线集成技术的发展。



图4 微带天线结构的薄膜阵面剖面示意图

3.2 设备功能一体化及集成化设计

在新方案的基础上,需要进一步提升单机设计集成度,以适应新型天线方案的设计需求。

3.2.1 综合馈电网络

有源相控阵面中的电源、控制、微波馈电网络采用综合电路技术一体化设计,可以极大的提高阵面的性能和可靠性,同时减轻阵面重量、缩小体积。这类综合网络在解决多层微波与高速数字电路一体化仿真与设计技术、复杂信号完整性及电磁兼容分析技术、微波多层电路垂直互联技术等多项技术后,有望使得馈电网络整体重量得到大幅下降。

3.2.2 高集成小型化 T/R 组件

新型三维架构片式 TR 组件利用集成电路技术将众多的有源器件集成在一块衬底上,从而省掉组件之间电气连接,一方面可减小损耗和噪声,提高可靠性,另一方面也使得组件结构更为紧凑、重量更轻、外形更为灵活^[5]。这类片式 TR 组件需研究微波多层基板制造、器件封装、芯片检测以及板间垂直互连等多项内容,具有高集成度的片式高集成 T/R 组件与当前 T/R 组件重量相比,可减轻 1/3 以上。

3.3.3 分布式电源与波控

采用分布式的电源和波束控制方案,一方面更有利于提高天线的可靠性,降低设计的复杂度,从而有利于简化设计,满足天线整体轻量化的技术需要。在具体设计过程当中,采用高集成度的芯片器件,设计出切合有源阵系统的功能完善、可靠性高、功耗低且适应空间环境的分布式电源和波束控制模块,通过与综合馈电网络的紧密结合,实现天

线供电和波束控制系统小型化、高可靠的目标。

3.3.4 轻型高精度支撑结构

相控阵框架结构在确保相控阵天线性能实现方面起着重要作用。高精度、轻型化是天线结构面临的重要研究课题。结构的设计实现需要密切配合天线阵面电性能设计,同时也强调自身重量的轻型化以及大尺寸下天线各部对接的精确性。因此一方面将优化整体结构方案设计,同时还研究采用轻型的复合材料^[6],从而保证天线不仅结构重量轻,而且强度高,且适应空间环境应用需要。

3.3 轻量化技术的研发重点

实现星载有源相控阵天线的轻量化,是一项长期系统的工程。围绕这一目标,不仅需要有创新性的设计理念,同时也需要有先进的器件、工艺技术相配合,确保整个天线从设计到制造环节流程畅通。在设计理念方面,着重于开展轻量化天线的系统方案设计与优化,从天线内部构造、布局以及机电一体化结合方面,进行全局考虑,获得系统最优设计;与此同时,进一步加强对适应于星载环境应用的高性能、高可靠和长寿命集成器件的研发,包括对 T/R 组件、波控及二次电源变换相关器件;最后为确保天线从设计到制造环节的畅通,对高集成化天线涉及的关键工艺也需要大量的研发投入。

4 结论

星载雷达技术的发展要求有轻量化的相控阵天线与之相适应。本文就现有星载雷达相控阵天线在轻量化方面面临的技术问题以及研究重点进行了探讨。就目前技术状态而言,星载相控阵天线的轻量化,势必要突破现有天线结构制式,利用新设计理论、轻型材质、新器件以及新工艺来构建一体化的有源相控阵天线,以达到在大口径下保持天线较小收拢体积和较轻重量的目的。从这个意义上来看,星载天线的轻量化,将不仅仅指天线在重量方面得到下降,同时也意味着天线集成度和性能的进一步提升,这将是一个长期的、复杂的过程,其中涉及到的新技术,也正是保持相控阵天线技术领先需要进行的攻关内容。

参 考 文 献

- [1] 张光义, 空间载预警雷达探测技术, 电子科学技术评论, 2004 年第 3 期。
- [2] 薛放, 美国成像侦察卫星发展趋势, 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005 年第 1 期
- [3] 王继学, 星载合成孔径雷达天线的工程设计, 上海航天, 2003 年第 2 期
- [4] J. Huang, "The development of inflatable array antennas," IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 43, pp. 44-50, Aug. 2001.
- [5] M. S. Hauhe and J. J. Wooldridge, "High Density Packaging of X-band active array modules", IEEE Trans. components, packaging, and manufacturing technology, vol. 20, No. 3, Aug. 1997.
- [6] 鞠金山, 汪方宝, 先进复合材料在星载 SAR 系统中的应用, 电子机械工程, 2006 年第 2 期。

作者简介:

张金平, 男, 工程师, 主要研究领域为宽带有源相控阵技术;

李建新, 男, 研究员, 主要研究领域为有源相控阵天线技术。

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,一直致力和专注于微波、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>