

金谋平, 张小林, 王泉. 电磁计算在雷达设计中的应用及需求分析[J]. 电波科学学报, 2020, 35(1): 135-140. DOI: 10.13443/j.cjors.2019083103
JIN M P, ZHANG X L, WANG Q. Application and requirement analysis of electromagnetic computation in radar design [J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(1): 135-140. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2019083103

电磁计算在雷达设计中的应用及需求分析

金谋平^{1,2} 张小林^{1,2} 王泉^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 合肥 230088; 2. 安徽省天线与微波工程实验室, 合肥 230088)

摘 要 随着计算电磁学和计算机技术的迅速发展, 电磁计算在雷达设计中扮演着举足轻重的角色. 本文分析了电磁计算在雷达设计中的应用, 包括雷达天线设计、馈线及微波网络设计、天线罩设计以及复杂电磁环境雷达天线性能评估, 并介绍了有限元法(finite element method, FEM)、矩量法(method of moment, MoM)和时域有限差分(finite-difference time-domain, FDTD)法三种常用的全波电磁仿真计算方法以及高频近似算法, 最后讨论了雷达技术发展对电磁计算的新需求.

关键词 电磁计算; 雷达系统; 天线设计; 电磁仿真; 电磁环境

中图分类号 O441; TN957 **文献标志码** A

文章编号 1005-0388(2020)01-0135-06

DOI 10.13443/j.cjors.2019083103

Application and requirement analysis of electromagnetic computation in radar design

JIN Mouping^{1,2} ZHANG Xiaolin^{1,2} WANG Quan^{1,2}

(1. No. 38 Research Institute, China Electronic Technology Group Corporation, Hefei 230088, China;

2. Anhui Province Engineering Laboratory for Antenna and Microwave, Hefei 230088, China)

Abstract With the rapid development of computational electromagnetism and computer technology, electromagnetic computing plays an important role in radar design. This paper introduces the application of electromagnetic computing in radar design, including radar antenna design, feeder and microwave network design, radome design and performance evaluation of radar antenna in complex electromagnetic environment. Three common methods of full wave electromagnetic simulation, such as finite element method, moment method and time domain finite difference method, and high frequency approximation are introduced. Finally, the new requirements for electromagnetic computing in radar technology are given.

Keywords electromagnetic computation; radar system; antenna design; electromagnetic simulation; electromagnetic environment

引 言

计算电磁学是以电磁场理论为基础, 以数值计算技术为手段, 运用计算数学提供的各种数值方法, 解决复杂电磁场理论和工程问题的应用科学. 随着计算电磁学和计算机技术飞速发展, 高效精确的计算仿

真方法不断涌现, 商业化的仿真软件纷纷面世更新, 电磁计算在实际工程问题中得到广泛应用, 成为解决雷达系统中越来越复杂的电磁建模仿真、优化设计的一个重要手段^[1-3]. 另一方面, 随着雷达技术的不断发展, 作为雷达一个重要组成的天线系统设计也发生巨大的变化, 从而对电磁计算提出了更高的要求.

收稿日期: 2019-08-31

资助项目: 安徽省重点研究与开发计划(201904b11020005)

联系人: 金谋平 E-mail: jinmoup_cn@sina.com

1 电磁计算在雷达设计中的应用

雷达是利用物体对电磁波的散射来发现目标、测定目标参数、识别目标的设备。雷达系统研制中涉及到的电磁问题有两类:一类是电磁场内问题,即由金属边界或介质边界将电磁波约束在一个相对封闭的区域,包括功分器、滤波器、环行器、传输线变换接头等在内的馈线系统及无源网络;另一类是外问题,即电磁波辐射和散射问题。电磁波辐射问题包括天线、天线罩以及天线布局的分析设计,对于机载、弹载、舰载多载荷平台而言,分析平台对雷达天线的影响以及多天线系统之间的电磁兼容也是重要的一项工作;电磁波散射问题涉及到雷达天线的雷达散射截面(radar cross section, RCS)分析设计,这对于有隐身要求的雷达而言是至关重要的。

1.1 雷达天线设计

天线是一个能量转换器,将传输线上传播的导行波转换成在自由空间中传播的电磁波,是雷达系统中电路与空间的界面窗口。随着雷达技术的不断发展,阵列天线已成为雷达天线的主流,其设计思路和方法也发生了巨大变化。同时由于计算机技术和电磁计算方法的不断发展和深入,雷达天线的设计也越来越依赖电磁仿真工具。

阵列天线与孤立的天线单元不同,它是若干个相同的天线单元按照一定的规律或随机排布在一条直线或平面或曲面或三维任意位置来实现更多的功能,如波束扫描、波束赋形、零点生成、副瓣抑制等。阵列天线的设计是一个复杂的优化问题,优化设计的前提是能够对天线实现精确分析,这一工作由电磁仿真计算来完成,它对电磁仿真计算的需求有以下特点:

1) 组成阵列天线的天线单元形式种类繁多,结构复杂度且材料组成也各不一样,电磁计算必须具有对不同材料精细结构的建模能力,保证计算结果的精度。

2) 电磁计算还必须具备对天线端口精细建模的能力。端口是每个天线单元能量馈入的接口,可以看作是一种特殊的边界条件。端口可能具备不同模式的传输能力,而且不同模式的反射通常也不同。

3) 电磁计算需要考虑合理的阵列天线单元的设计方式。阵列天线单元间存在着不同程度的耦合,这些耦合会影响天线单元的有源匹配,因此阵列天线的单元设计与孤立天线单元的设计是不同的,必须在阵列环境下设计天线单元。在天线单元设计

阶段,天线的参数需要反复调整,如果在一个有限大的小阵环境中去调整这些参数,设计效率将非常低下。通常阵列天线的单元排布具有周期性,电磁计算应考虑这一周期性,用仿真一个天线单元的方式去分析其在阵列环境中的性能,提高设计效率。

4) 电磁计算需要考虑如何提高电大尺寸阵列天线的计算效率。阵列天线的尺寸通常较大,如果采用通用的三维电磁计算方法去求解电大尺寸问题,其对计算机资源的需求将是非常庞大的。在考虑阵列天线的问题时,可以利用阵列中每个天线单元结构完全相同的特点,考虑如何提高阵列天线的计算效率,对于周期阵列,还可以利用周期性来进一步提高效率。

1.2 馈线及微波网络设计

馈线和微波网络是雷达信号从发射机到天线或者由天线到接收机的传输路径,通常包括阻抗变换器、滤波器、耦合器、功分器、环行器等无源微波网络,一般结构较为复杂,必须借助电磁计算来完成,这属于电磁场内问题。

馈线和微波网络的结构一般非常精细,而且网络端口的驻波要求很高,电磁计算时必须保证对精细结构的精确仿真。另外,对于滤波器这一类利用谐振来工作的微波器件,或者是功分器腔体内可能存在某些频率的谐振,电磁计算需要具备对谐振结构的精确仿真能力。

1.3 天线罩设计

天线罩是用来防护雷达天线的一种设备,为了不影响雷达天线正常工作,天线罩要求具有良好的透波性能。天线罩通常由一层或者多层介质材料组成,常用的 A 夹层天线罩类似三明治,两外侧蒙皮是一层很薄(通常小于 0.05λ)的介质材料,而中间芯层则是具有低介电常数的材料,如纸蜂窝和泡沫等,用于支撑蒙皮,保持天线罩的形状和强度等。从天线罩的结构可以看出,天线罩的设计需要电磁计算具有对精细结构尤其是薄介质片的精确分析能力。

1.4 复杂电磁环境雷达天线性能评估

由于天线属于开放场问题,天线既会向外辐射能量,也会受到其架设和安装环境的影响,如安装平台的结构遮挡、相邻天线的相互干扰、地面地形的反射影响等。复杂电磁环境下天线性能的评估对于雷达天线设计来说也是一项非常重要的工作,电磁计算在其中体现了重要的价值。一般来说,复杂电磁环境下天线性能的评估主要需要解决电大尺寸电磁

仿真问题,根据频率的不同,整个计算空间的维度可能达到几个到几千个波长,因此需要电磁计算具有较高的计算效率,在计算机资源不充足的条件下,也可以在精度和效率间折衷,至少能够提供近似的评估效果来指导雷达天线的安装。

2 雷达设计中电磁计算解决方案

根据上面的分析,雷达系统设计的不同方面对电磁计算的需求侧重有所不同,随着计算机技术的发展和电磁计算方法研究的不断深入,目前有多种成熟的电磁计算方法已经成功用于雷达系统设计,包括三维全波电磁计算方法和高频近似算法。

2.1 三维全波电磁计算

三维全波电磁计算方法需要根据电尺寸划分网格,电尺寸越大,网格数越多,需要的计算资源也越多,属于低频方法。目前应用范围最广的三种电磁计算方法为有限元法(finite element method, FEM)、矩量法(moment of method, MoM)和时域有限差分(finite-difference time-domain, FDTD)法。

2.1.1 FEM^[4-5]

FEM 是一种广泛应用于电磁、热学、力学等物理问题的方法,它基于微分方程,对求解的整个空间进行网格剖分,通过变分的方法建立并求解线性方程组,其矩阵为稀疏矩阵。将 FEM 用作电磁计算,其主要优势包括以下几个方面:

1) 采用四面体网格能够更加精确地逼近金属或介质的形状,保证电磁计算的精度,这也是其得到广泛应用的最根本原因。

2) 方便对端口进行模式计算,能够更合理地处理各种端口。

3) 方便和 Floquet 理论结合,通过在周期边界上引入附加相位差来分析周期结构,如无限大阵列中的天线单元。

根据其算法的特点,FEM 也有一些缺点,主要表现在以下两个方面:

1) 对于天线等开域问题,需要在计算边界处采用一定方式进行截断以模拟开放空间,计算边界吸收不良引起的数值反射会影响计算结果的精度。

2) FEM 对计算空间的所有区域,包含仿真各部分结构间的空气部分必须进行网格剖分,在计算比较分散的各部分时,在空气部分的内存消耗很大。

根据 FEM 的上述特点,FEM 适合于对电磁结构的精细分析,包括天线单元、馈线和微波网络、阵列环境中的天线单元设计等问题,但不太适用于

电大尺寸问题分析。目前已有多款电磁商业软件采用 FEM,如 ANSYS-HFSS、CST 中的频域求解器、无锡飞谱公司的 Rainbow EM Stuido 等。但最流行的应用于天线设计的当属 ANSYS-HFSS,它不仅发扬了 FEM 精度高的特点,还针对其缺点,对于电大尺寸周期阵列推出了有限大阵列工具,通过利用天线单元网格的重复性,使计算资源消耗成数量级地减少,大大提高了大规模阵列天线的计算效率。

2.1.2 MoM^[6-7]

MoM 是一种基于积分方程的方法,它将“源”进行基函数展开,并引入“源”之间的反应,通过加权余量法建立线性方程组,其矩阵为稠密矩阵,将其应用于电磁计算,主要有如下几个优点:

1) 只在“源”区划分网格,而“场”区的空气部分无需网格,因此未知量相对较少。

2) 基于积分方程,对于开放问题,无需进行空间截断,特别适合于开域问题,如天线和目标散射特性分析等。

3) 可将计算区域进行组合,采用多层快速多极子方法进行加速,更适用于电大尺寸电磁问题的计算。

它的不足主要体现在以下两个方面:

1) MoM 采用面等效方法,仅在物体表面划分网格,而在介质内部不划分网格。对于介质网格,需要同时计算等效电流和等效磁流,未知量比金属网格增加一倍,从而增加内存的计算消耗。

2) 采用多层快速多极子求解电大尺寸问题时,即使不存在腔体结构,也有可能存在收敛性问题。

根据 MoM 的上述优缺点,它更适用于天线布局、复杂电磁环境雷达天线性能评估、电大尺寸目标散射特性分析和大规模阵列天线等电大尺寸问题的求解。现有采用 MoM 的商业软件有 FEKO、ANSYS-HFSS 的 IE Solver、CST 中的 IE Solver、ADF、Rainbow EM Studio、Hobbies、WIPL-D 等。FEKO 是目前广泛应用的一款,特别是它的多层快速多极子,具有非常高的效率,并引入混合积分方程解决大多不收敛的问题,适合用于电大尺寸电磁计算问题。

2.1.3 FDTD 法^[8-10]

FDTD 法是一种基于 Maxwell 旋度方程的时域算法,对求解的整个空间进行空间离散,同时在时域上进行离散,通过显示迭代,直接计算电场和磁场的空间和时间分布。它的优点主要有:

1) 基于微分方程,在整个计算空间均划分网

格,适用材料的范围较广。

2) 一种时域算法,通过一次计算可以获得宽频段性能,尤其适合宽频带仿真。

3) 无需求解线性方程组,计算内存消耗与网格数的一次方成正比,在计算电大尺寸电磁问题时,所需计算资源较小。

4) 适合于分区域计算,并且天然适合并行计算,具有较高的并行计算效率。

FDTD 算法的缺点也十分明显,主要表现在:

1) 采用六面体网格,对精细结构的逼近精度较差,虽然可以采用共形网格来提高精度,但仍然不如有限元精度高,因此不太适合于特别精细结构的仿真。

2) 当空间网格尺寸较小时,受限于稳定性条件,其时间步长会正比缩小,导致时域脉冲持续的时间补偿增加,增加计算时间。

根据 FDTD 法的特点,它可用于时域电磁仿真、超宽带天线设计、电大尺寸目标散射特性分析、电大尺寸天线罩分析等场合,当结构比较复杂时,其精度不如前两种方法。现有采用 FDTD 法的商业软件包括 XFDTD、EAST FDTD、EMPIRE 等,CST 时域求解器中采用的时域有限积分方法其实质上与 FDTD 法相同。从易用性和流行程度来看,CST 的时域求解器应用最为广泛,它的专有理想边界近似(perfect boundary approximation, PBA)在处理复杂结构时也具有较好的精度,此外,EAST FDTD 是中国自主知识产权的一款 FDTD 软件,在电大尺寸天线罩计算方面有很多独到之处。

2.2 高频近似算法

上述三种算法均属于低频算法,当计算问题的电尺寸特别大,而计算资源受到限制时,全波仿真算法便无能为力了。如计算飞机、航母等目标在 X 波段以上频段的 RCS 时,其电尺寸超过上万个波长,此时最好的选择是高频近似算法,如物理光学法(physical optics, PO)、几何光学法(geometrical optics, GO)、一致性绕射理论(uniform theory of diffraction, UTD)和弹跳射线法(shooting and bouncing ray, SBR)等,可以得到一些近似的结果来指导系统设计。目前高频近似算法最全的商业软件为 FEKO,其应用效果已被若干实际工程验证,能够实现可接收范围内的精度。

2.3 混合算法

对于雷达系统设计中的电磁计算,混合算法亦是一种很好的解决方案,当一种方法受限或计算效

率不高时,采用混合算法往往能起到另辟蹊径的效果。在此列出几个典型商业软件中应用比较多的几种场景,如 HFSS 中 FEBI 边界条件,实现了 FEM 和边界元的混合^[11],可以更好地解决计算空间截断的问题;如 FEKO 中的多层快速多极子与 MoM、多层快速多极子与有限元、PO 与 MoM 等多种组合的混合算法,可以很好地解决电大尺寸、介质等复杂的电磁计算问题。

3 雷达技术发展对电磁计算的需求

工作目标、使用环境和作战任务是促成雷达体制、频段、理论和技术不断发展演变的三个主要外部因素^[12]。进入 21 世纪以来,雷达工作目标多样化、使用环境复杂化和作战任务多元化极大地促进了雷达技术的发展。未来雷达呈现“两极三化”发展趋势,以“大阵列”(极大)加“微系统”(极小)为基本形态,以“多功能一体化、平台载荷一体化、雷达/通信/电子战一体化”为基本支撑。作为雷达一个重要组成部分的天线系统设计也发生巨大的变化,从而对电磁计算提出了更高的要求。

3.1 大规模多尺度复杂模型的电磁计算仿真能力

雷达的多功能一体化综合射频使用宽带多功能孔径取代目前平台上为数众多的天线孔径,同时实现雷达、电子战与通信、导航、识别等多种射频功能,使电子系统的成本、重量、功耗、失效率显著下降,以解决舰载、机载平台上天线林立、遮挡、电磁干扰、RCS 过大、维修困难、成本过高等问题^[13]。

随着各种载荷装备电子系统能力要求的提高和扩展,对天线的带宽、扫描范围和功率孔径积等要求也相应提高,使得大孔径天线在飞机、卫星等平台上的安装矛盾突出,因此,较好的解决办法是把雷达天线和平台融合在一起。共形相控阵天线将天线阵列与平台外形共形,甚至作为平台表面的一部分,可以显著改善平台对雷达天线的限制,充分利用平台面积,增大天线口径,提高对隐身目标的探测距离,改善雷达天线对安装平台空气动力学性能的不良影响,改善普通平面相控阵雷达天线宽角扫描性能退化较大的缺点。共形相控阵天线和超薄型设计技术是未来载荷领域相控阵雷达的一个发展趋势^[14]。

随着多功能一体化、平台载荷一体化雷达技术的发展,电磁计算所要解决的电磁场问题也越来越复杂。多功能一体化综合射频要满足雷达、通信、电子战等多个应用需求,一般采用超宽带阵列天线、共用孔径技术,覆盖的频率范围可达 100 : 1,不同频

段的天线外形尺寸会差异很大,同时大功率孔径要求也使得天线阵面增大,增大电磁计算仿真的规模和复杂度。

在平台载荷一体化雷达系统中,阵列天线的性能易受到平台环境的影响,一般天线的尺度在半波长以下,而平台比如机载平台则有数十个甚至几百个波长,要分析、评估机载天线和机载平台环境的相互影响,就要解决大规模多尺度复杂电磁仿真计算问题。

另外,随着电磁场理论的发展,人工电磁材料越来越多应用到微波系统设计中,以实现电磁波的极化、传播、滤波等调控,这些人工电磁材料一般由形状各异的单元周期排列构成,单元尺寸在十分之一波长以下,组合成的周期性材料尺度较大,也构成一种多尺度复杂结构。

3.2 多物理场电磁分析能力

毫米波相控阵雷达具有频带宽、空间分辨力高、一定的抗干扰能力、目标分辨识别能力高以及全天候工作能力等诸多优点,毫米波有源相控阵已成为当前天线微波领域新的技术热点^[15]。

随着元器件设计、工艺集成技术的进步,毫米波相控阵技术不断向高频段扩展,集成程度也越来越高。在高频段,毫米波相控阵天线的形态将发生很大变化,即通过大量使用先进的异质、异构封装技术,相控阵天线乃至后端射频、数字处理部分将以一个完整的系统级封装(system in a package, SIP)模块出现,并可能与声、光、磁等其他类型传感器进行再次集成,而传统的集成方式在工作波长3~5 mm量级频段下已无法实现。相控阵有源阵面设计与器件设计乃至整部雷达的设计已密不可分,系统的硬件设计某种意义上来说已与器件、封装融为一体,器件及封装等技术将决定电子系统实现的可行性。

在高密度集成的毫米波相控阵天线中,温度的变化会改变有源电路的工作特性,温度产生的形变也会改变天线的性能。在这种情况下,电磁结构分析和设计应该是考虑其在电磁场-温度场-力场的多物理场耦合情况下的最优设计。

3.3 智能化的电磁仿真设计能力

目前的电磁仿真设计还是基于设计师经验的设计方式,有些电磁计算商用软件建立了一些模型库,供设计师参考,或采取多参数全局优化技术,但总的来说效率不高,主要取决于设计师的经验。随着大规模并行计算能力的提高、全局随机优化算法以及

人工智能技术的发展,逐步形成智能化电磁仿真设计能力。

4 结束语

电磁仿真计算已成为是雷达天线设计中不可或缺的分析设计工具,随着雷达技术的发展,其电磁问题越来越复杂,对于电磁计算的要求也越来越高,必将促进电磁计算的进步,同样电磁计算技术的发展也将推动雷达技术的发展。

参考文献

- [1] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] 盛新庆. 计算电磁学要论[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [3] 周海京. 计算电磁学及其在复杂电磁环境数值模拟中的应用和发展趋势[J]. 计算物理,2014,31(4):379-389.
ZHOU H J. Computational electromagnetics and applications in numerical simulation of electromagnetic environmental effects and development tendency[J]. Chinese journal of computational physics, 2014, 31(4):379-389. (in Chinese)
- [4] SILVESTER P P, FERREAR R L. Finite elements for electrical engineers[M]. London: Cambridge University Press, 1983.
- [5] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 王建国,译. 西安:西安电子科技大学出版社,1998.
- [6] HARRINGTON R F. Field computation by moment methods[J]. New York: Macmillan, 1968.
- [7] 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法[M]. 北京:电子工业出版社,1984.
- [8] 王长清,祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法[M]. 北京:北京大学出版社,1994.
- [9] TAFLOVE A. Computational electrodynamics: the finite difference time domain approach[M]. Norwood: Artech House,1995.
- [10] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [11] SHENG X Q, JIN J M, SONG J M, et al. On the formulation of hybrid finite-element and boundary-integral methods for 3-D scattering[J]. IEEE transactions on antennas and propagation,1998,46(3): 303-311.
- [12] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析[J]. 雷达学报,2012,1(1):19-27.
YANG J Y. Development laws and macro trends analysis of radar technology[J]. Journal of radars,2012,

- 1(1):19-27. (in Chinese)
- [13] 邵春生. 相控阵雷达研究现状与发展趋势[J]. 现代雷达, 2016, 38(6):1-4.
SHAO C S. Research status and development trend of phased array radar[J]. Modern radar, 2016, 38(6): 1-4. (in Chinese)
- [14] 郭先松. 机载预警雷达天线发展趋势及关键技术[J]. 现代雷达, 2015, 37(12): 19-24.
GUO X S. Development trend and key technology of airborne early-warning radar antenna[J]. Modern radar, 2015, 37(12): 19-24. (in Chinese)
- [15] 周志鹏. 毫米波有源相控阵天线技术[J]. 微波学报, 2018, 34(1): 1-5.
ZHOU Z P. Millimeter wave active phased array antenna technology[J]. Journal of microwaves, 2018, 34(1): 1-5. (in Chinese)

作者简介

金谋平 (1968—), 男, 安徽人, 中国电子科技集团公司第三十八研究所研究员, 主要研究方向为相控阵天线技术.

张小林 (1981—), 男, 湖北人, 中国电子科技集团公司第三十八研究所研究员, 主要研究方向为相控阵天线技术.

王泉 (1988—), 男, 安徽人, 中国电子科技集团公司第三十八研究所高级工程师, 主要研究方向为相控阵天线技术.