

超宽带平面天线 辐射与散射综合设计技术

CHAOKUANDAI PINGMIAN TIANXIAN FUSHE YU SANSHE ZONGHE SHEJI JISHU

张厚 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

内容简介

超宽带平面天线辐射与散射综合设计技术

张厚著

国防工业出版社

内 容 简 介

全书以超宽带平面天线的辐射与散射综合设计为主线,对超宽带天线和阵列的辐射、散射特性和雷达散射截面减缩方法进行了分析,重点对宽缝天线、单极子天线、变极化平面天线和阵列天线的辐射与散射特性及综合进行了论述。

本书可供从事雷达、电子对抗以及微波技术与天线的工程技术人员使用,也可以作为高等院校电子类专业研究生的教材和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

超宽带平面天线辐射与散射综合设计技术/张厚著.

—北京:国防工业出版社,2015.2

ISBN 978-7-118-09829-7

I. ①超… II. ①张… III. ①超宽带天线—平板天线—辐射—天线设计②超宽带天线—平板天线—散射—天线设计 IV. ①TN821

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 016698 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 10½ 字数 219 千字

2015 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

作为国际上蓬勃发展的一种革命性无线通信技术,超宽带(Ultra-Wide Band, UWB)技术具有小范围超强的无线设备连接能力,而且拥有高技术性能、低功耗和低成本无线数据通信的能力,在探地雷达、精确定位系统以及短距通信等方面已有广泛应用。UWB 雷达系统及 UWB 通信系统具有较高的距离分辨率、较强的抗干扰能力和精确的复杂目标的识别能力,在隐身、反隐身方面具有巨大的应用价值。UWB 天线是电子信息战中电子对抗设备的关键部件,在冲激雷达等时域系统中应用广泛。UWB 天线作为无线通信系统的射频前端,其隐身设计和研究是包括隐身平台在内的各种作战平台不可忽略的问题。因此,减缩 UWB 天线的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)意义重大。

天线作为收发设备的前端,它的基本功能是接收和发射电磁波。天线的 RCS 减缩即是要保证天线在工作频带范围内一定辐射性能的前提下,最大限度地降低其雷达散射截面。宽带天线 RCS 减缩所面临的最大问题就是在宽带工作范围内天线辐射与散射性能两方面的兼顾。要求雷达天线只辐射和接收我方雷达波,不反射或不散射敌方雷达波,这是实际中很难解决的一对矛盾。因此,如何在宽频范围内兼顾天线的辐射与散射性能,是天线领域的一个研究热点问题。

本书旨在超宽带平面天线的辐射与散射的综合设计,对超宽带天线和阵列的辐射、散射特性和 RCS 减缩方法进行了分析,重点对宽缝天线、单极子天线和阵列天线的辐射与散射综合进行了论述。

全书共分为 7 章,第 1 章为概述,主要介绍了超宽带天线研究的意义、超宽带天线与天线隐身技术的研究现状和用于分析天线辐射散射特性的几种数值计算方法:有限元法、矩量法、时域有限差分法和遗传算法。第 2 章介绍了天线的辐射、接收基本理论和天线单元、阵列的散射基本理论。第 3 章将分形用于宽带天线的 RCS 减缩,设计并制作了低 RCS 的超宽带缝隙天线,分析了分形缝隙天线的阻抗带宽随着相关尺寸变化的规律,分析了其辐射特性和不同负载下的单站散射特性。第 4 章基于仿生学原理,介绍了新型的低 RCS 超宽带叶片单极子天线,分析了其辐射特性和 4 种不同入射波照射下的单站散射特性。通过在该天线的微带传输线上嵌入一个滤波器,实现了低 RCS 叶片天线的陷波特性和。同时,给出了一种新型低 RCS 的超宽带雀翎单极子天线,并分析了其辐射和两种不同入射波照射下的散射特性。第 5 章首先介绍了极化的有关概念,然后论述了变极化天线单元的设计与性能分析,最后,对变极化馈电网络和变极化平面天线阵的辐射特性进行了分析,给出了变极化平面天线阵列的设计结果。第 6 章推导出了改进的阵列散射因子表达式,并用阵列散射因子结合 HFSS 软件仿真,分析了宽带单极子线阵、平面阵的辐射和单站、双

站、镜像、前向散射特性。第7章给出了超宽带阵列辐射和散射综合优化的方法。通过对辐射阵因子和阵列散射因子在宽频带内的综合优化,找出阵列单元的最优位置分布,使阵列天线的散射和辐射栅瓣得到有效抑制,并具有低副瓣特性,为宽频带低 RCS 阵列天线的设计提供了有益的参考。

本书是作者近几年所做工作的归纳和总结,是作者在超宽带平面天线辐射与散射综合方面的一些初步工作,相信随着研究的深入,会有更多的研究成果出现。研究生徐海洋、杨自牧和吴文洲对书中的算例进行了仿真和分析并协助撰写了部分内容,吴瑞对文中的插图一一予以了校对,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足,恳请读者给予批评指正。

作者

2014 年 12 月

目 录

第1章 概述	1
1.1 超宽带天线的研究意义	1
1.2 超宽带天线与天线隐身技术的国内外发展	2
1.3 常用分析天线特性的数值方法	6
1.3.1 有限元法(FEM)	6
1.3.2 矩量法(MoM)	7
1.3.3 时域有限差分法	8
1.3.4 遗传算法(GA)	11
1.4 本章小结	16
第2章 天线辐射和散射的基本理论	17
2.1 引言	17
2.2 天线辐射的基本理论	17
2.3 天线接收的基本理论	19
2.4 天线散射的基本理论	22
2.4.1 天线模式项散射与辐射特性的关系	22
2.4.2 天线散射基础理论模型与表达式	23
2.4.3 天线散射的其他表达式	26
2.5 阵列天线散射的理论模型	27
2.6 本章小结	29
第3章 宽缝天线的辐射与散射	30
3.1 引言	30
3.2 缝隙天线的基本特性	30
3.2.1 理想缝隙天线	30
3.2.2 微带窄缝天线	32
3.2.3 微带宽缝天线	33
3.3 分形的典型结构及特点	35
3.4 微带馈电的超宽带缝隙天线的辐射与散射	36
3.4.1 参考天线的散射特性	37
3.4.2 分形缝隙天线的辐射特性	39
3.4.3 分形缝隙天线的散射特性	44

3.5 共面波导馈电的 Koch 分形缝隙天线的设计	46
3.5.1 共面波导的基本特性	46
3.5.2 共面波导馈电的分形缝隙天线	47
3.6 本章小结	49
第4章 单极子天线的辐射与散射	50
4.1 引言	50
4.2 单极子天线的基本工作原理	50
4.3 叶片天线的辐射与散射	52
4.3.1 叶片天线的辐射特性	52
4.3.2 叶片天线的散射特性	57
4.3.3 陷波特性的叶片天线	61
4.4 雀翎天线的辐射与散射	64
4.4.1 雀翎天线的辐射特性	64
4.4.2 雀翎天线的散射特性	67
4.5 本章小结	69
第5章 变极化平面天线阵列	71
5.1 引言	71
5.2 极化的有关概念	71
5.2.1 电磁波的极化与天线的极化	71
5.2.2 极化匹配与极化正交	73
5.2.3 部分极化波与相干矩阵	74
5.2.4 极化散射矩阵	75
5.2.5 极化与目标 RCS 测量的关系	76
5.3 变极化平面天线单元设计与性能分析	77
5.3.1 槽耦合多层平面变极化天线基本单元设计	77
5.3.2 槽耦合多层平面变极化天线基本结构参数	79
5.3.3 槽耦合多层平面变极化天线辐射特性	80
5.3.4 计算实例	82
5.4 基于 CST 仿真软件和遗传算法优化天线结构参数	84
5.4.1 多层槽耦合平面天线尺寸遗传算法优化	84
5.4.2 基于 CST 仿真软件多层平面天线结构参数的遗传算法优化	86
5.5 变极化平面天线阵列设计	87
5.5.1 天线阵列性能指标	88
5.5.2 二元阵列设计	88
5.5.3 基本子阵(四元阵)性能分析	89
5.5.4 阵列综合	93

5.6 波导带线混合馈电变极化平面天线	97
5.6.1 FDTD 法分析波导—同轴—带线过渡结构传输特性	98
5.6.2 FDTD 法分析混合馈电变极化平面天线	102
5.6.3 波导功分网络	105
5.6.4 变极化平面天线阵列馈电网络	107
5.6.5 混合馈电变极化平面天线系统设计	108
5.7 本章小结	111
第6章 超宽带阵列的辐射与散射特性分析	112
6.1 引言	112
6.2 阵列天线的辐射特性分析	113
6.2.1 方向图乘积定理	113
6.2.2 栅瓣和旁瓣	115
6.3 超宽带阵列天线的散射方向图乘积表达式	117
6.3.1 结构模式项散射	117
6.3.2 天线模式项散射	119
6.4 超宽带单极子天线阵的辐射与散射特性分析	121
6.5 本章小结	142
第7章 超宽带阵列辐射与散射综合设计	144
7.1 引言	144
7.2 粒子群算法	145
7.2.1 PSO 算法简介	145
7.2.2 PSO 算法基本原理和流程	145
7.3 天线阵辐射与散射方向图的综合	146
7.4 本章小结	152
参考文献	153

第1章 概述

1.1 超宽带天线的研究意义

现代电子科技的迅猛发展,使得现代战争演变成具有通信、探测、导航及目标隐身等功能的电子设备之间的战争,敌对双方的电子侦察与反侦察,电子干扰与反干扰等电子战主导权之争愈演愈烈。在现今的高技术局部战争条件下,隐身技术在电子战中占有重要的地位^[1]。

隐身技术,是现代军事上隐蔽自己以免被敌人发现,借以增强突击能力和自我保护的重要手段。它作为现代电子战与信息化战争中的重要组成部分,已经受到越来越多国家的重视。RCS 表征雷达目标截获和散射信号功率的能力^[2],它是雷达探测技术、隐身和反隐身技术中的一个重要特征参数。RCS 的减缩^[3]就是控制和降低目标的雷达特征,迫使敌方电子探测系统和武器平台降低其战斗效力,从而提高目标的突防能力和生存能力。狭义地说,RCS 减缩就是反雷达隐身技术。以减小 RCS 为目的的隐身技术包括如下 4 种基本方法,即外形隐身技术、雷达吸波材料隐身技术、无源对消技术和有源对消技术,最常用和最有效的是前两种技术^[4]。

通过改变外形和使用雷达吸波材料可以减小军事平台的 RCS,但是对于综合应用了以上隐身技术的低可见平台来说,平台上的天线对总 RCS 贡献占有很大的比例,因此,降低天线系统的 RCS 成为目标隐身术中的关键课题^[5-12]。

作为国际上蓬勃发展的一种革命性无线通信技术,超宽带(Ultra-Wide Band, UWB)技术^[13,14]具有小范围超强的无线设备连接能力,而且拥有高技术性能、低功耗和低成本无线数据通信的能力,在探地雷达、精确定位系统以及短距通信等方面已有广泛应用。UWB 雷达系统及 UWB 通信系统具有较高的距离分辨率、较强的抗干扰能力和精确的复杂目标的识别能力,在隐身、反隐身方面具有巨大的应用价值。UWB 天线^[15-18]是电子信息战中电子对抗设备的关键部件,在冲激雷达等时域系统中应用广泛。UWB 天线作为无线通信系统的射频前端,其隐身设计和研究是包括隐身平台在内的各种作战平台不可忽略的问题。因此,减缩 UWB 天线的 RCS 意义重大。

天线作为收发设备的前端,它的基本功能是接收和发射电磁波^[19]。天线的 RCS 减缩即是要保证天线在工作频带范围内一定辐射性能的前提下,最大限度地降低其雷达散射截面。减缩宽带天线 RCS 所面临的最大问题就是在宽带工作范围内天线辐射与散射性能

两方面的兼顾。要求雷达天线只辐射和接收我方雷达波,不反射或不散射敌方雷达波,这是实际应用中很难解决的一对矛盾^[6,20]。因此,如何在宽频范围内兼顾天线的辐射与散射性能,是天线领域的一个研究热点。

另一方面,宽频带相控阵天线应用于高分辨率成像,可以有效解决多目标分辨与识别、属性判别等难题,还可用于提高雷达射频综合能力、电子反对抗(Electronic Counter Counter Measures, ECCM)能力、抗反辐射导弹能力^[21,22]。而宽带阵列扫描天线的研制对提高现代雷达性能的意义非凡^[23]。在电子对抗中,在保证宽带雷达的探测和识别能力的前提下,提高其隐身性能,可以有效提高作战平台的战斗力。因此,UWB 天线阵列的辐射性能与 RCS 减缩研究无疑是又一个重要的课题。

总之,UWB 天线和 UWB 天线阵列的辐射和散射性能综合研究和相关 RCS 减缩规律的探索,具有重要的军事意义和广阔的应用前景。

天线的主要功能是:①能量转换器,即将馈线上的导波能量转换成自由空间的电磁波或反之;②具有定向辐射和接收能力,即要具有一定的方向特性和较高的效率。表征天线性能的主要参数有输入阻抗、驻波比、方向图、增益、极化方式等^[19,24]。

目前对于带宽的定义主要有两种。一种是按照 DARPA (Defense Advanced Research Projects) 的定义,相对带宽 $\mu > 25\%$ 的信号即为 UWB 信号^[25]。另一种是由 FCC 定义的相对带宽是 20%,另外,FCC 又把带宽大于等于 500MHz 的天线定义为 UWB 天线^[26]。其中上限频率 f_h 和下限频率 f_l 取为信号功率谱的 -20dB 点,相对带宽 μ 的定义为

$$\mu = \frac{2(f_h - f_l)}{f_h + f_l} \quad (1.1)$$

雷达散射截面:定量表征目标散射强弱的物理量称为目标对入射雷达波的有效散射截面面积,通常简称为目标的 RCS,用符号 σ 来表示,它是目标的一种假想面积^[27,28]。雷达目标反射或散射的能量也可表示为 RCS 与入射雷达波功率密度的乘积。单站和双站散射,分别对应为单站 RCS 和双站 RCS。雷达散射截面的定义是基于平面波照射下目标各向同性散射的概念。其最基本的理论定义式为

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H^s|^2}{|H^i|^2} \quad (1.2)$$

σ' 是一个标量,单位为 m^2 ,通常以对数形式给出,即相对于 $1m^2$ 的分贝数(又称为分贝平方米,记 dBsm),即 $\sigma(\text{dBsm}) = 10\lg\sigma$ 。二维 σ' 的单位为 m 或 dBm。

1.2 超宽带天线与天线隐身技术的国内外发展

具有宽带特性的最早天线是双锥天线,首先由英国的洛奇(Lodge)在 1898 年制成^[29],它可看成是激励 TEM 模的均匀渐变线,输入阻抗具有宽频带特性,其带宽主要受有限尺寸所导致的终端反射影响,在此基础上发展了单锥天线。1939 年,卡特提出了改进的双锥天线(Biconical Antenna)和单锥天线(Conical Antenna)^[30,31]。之后科学家又设计了球形、盘

锥、全向和定向同轴喇叭天线等不同结构的天线,这些天线都是三维结构,因而体积比较庞大。美国 Ohio 大学、美陆军研究实验室、Polytechnia 大学 WEBER 研究所等分别研制出了双菱形平面加反射板的 TEM 天线、加载 TEM 喇叭天线及微带天线阵列,具有一定的 UWB 特点,但是平衡馈电、天线尺寸及相对带宽的问题仍未解决好^[32]。

20 世纪 50 年代,美国伊力诺依大学拉姆齐(Ramsey)等人提出了两种与频率无关的天线——螺旋天线和对数周期天线^[33,34],可实现超过 10:1 的阻抗带宽,且体积相对较小,但由于该类天线没有稳定的相位中心而容易导致发射脉冲波形失真,它们只能算频域而非时域意义上的 UWB 天线。

20 世纪 70 年代后,出现了许多新型的 UWB 平面天线,主要可归纳为 3 类:一是 UWB 平面单极子天线,二是 UWB 印刷单极子天线,三是 UWB 印刷缝隙天线^[35]。Gibson1979 年提出一种开槽按照指数规律渐变的槽线天线,也称为 Vivaldi 天线^[36]。

近年来,为适应平面化、小型化、易集成的需求,UWB 印刷天线发展迅速^[37-53]。出现了许多性能优良的 UWB 印刷天线,它们具有频带宽、质量轻、体积小、低剖面、易共形等优势。比较典型的有单极子天线、缝隙天线等。通过对单极子辐射单元形状的设计,接地板与单元间集成匹配网络,可有效展宽带宽,单元常见的形状有圆形^[38]、椭圆形^[48]、方形^[49]、蝴蝶型^[54]等。图 1.1(a)~(d)所示为不同单元形状的单极子天线^[38,48,49,52]。

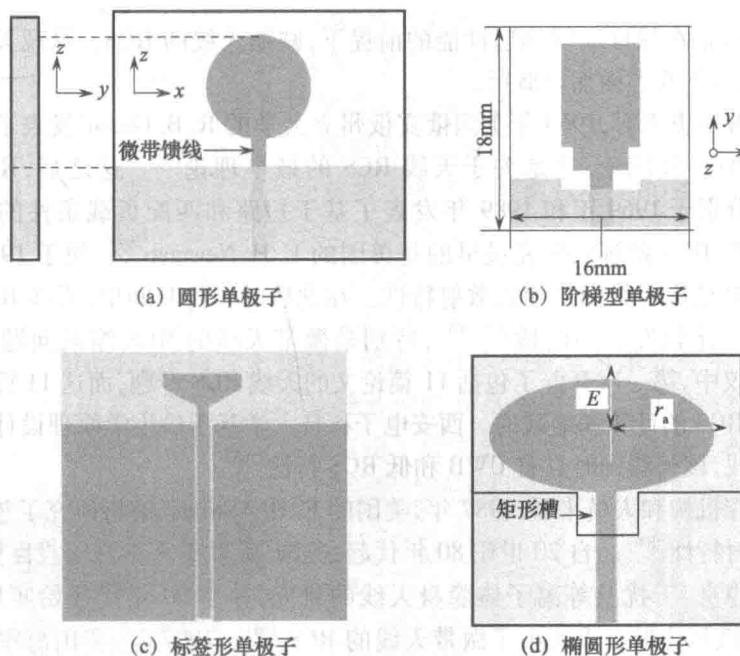


图 1.1 不同形式的单极子天线

宽带印刷缝隙天线^[55-75]由微带天线演变而来。它具有宽频带、低剖面、易加工和批量生产等优点,因此,受到研究者的重视。现在已设计出蝶形缝隙天线^[54-57]、矩形缝天

线^[58-63]、圆形缝隙天线^[77]、椭圆缝隙天线^[78]、三角形缝隙天线^[79]、分形缝隙天线^[73-76]等。图 1.2 所示为两种不同形式的缝隙天线。

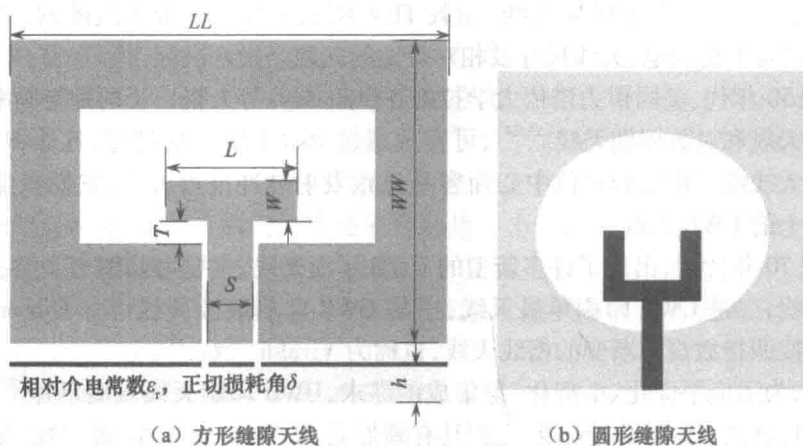


图 1.2 两种不同形式的缝隙天线

国内 UWB 天线的研究相对于国外较晚,但发展迅速,取得了一系列的成果和进展^[80-89]。

天线隐身即是在保证天线辐射性能的前提下,减缩天线的 RCS。纵观天线隐身技术的发展,可以从以下几方面加以概括。

(1) 从发展历史来看,1963 年美国俄亥俄州立大学的 R. B. Green 发表了基于共轭匹配的天线散射的一般理论,这是关于天线 RCS 的最早理论^[3]。这之后, R. E. Collin 和 R. C. Hhansen 分别于 1969 年和 1989 年发表了基于短路和匹配负载条件的天线散射理论^[90,91]。对天线 RCS 做解析研究最早的是美国的 E. H. Newman^[92],他于 1987 年最先研究了不考虑馈电结构的微带贴片的散射特性。在此后的一段时间里,天线 RCS 的缩减和控制经历了一个蓬勃发展的阶段^[93-104],特别是微带天线的 RCS 缩减问题。1992 年的 IEEE - APS 会议中,第一次开辟了包括 11 篇论文的天线 RCS 专题,而这 11 篇论文全部是讨论微带天线 RCS 的计算和缩减的。西安电子科技大学基于仿生学原理设计了类似昆虫触须的仿生天线,该天线同时具有 UWB 和低 RCS 特性^[105]。

(2) 从研究机构和人员来看,1987 年,美国的 E. H. Newman 解析研究了忽略馈电系统微带贴片的散射特性^[106]。自 20 世纪 80 年代起,美国、苏联等军事强国投巨资,开展一系列的等离子体隐身、干扰及等离子体隐身天线的研究,并于 90 年代开始实用^[107]。1992 年,David. M 用铁氧体做介质减小了微带天线的 RCS^[108]。1997 年,美国海军委托田纳西大学等单位开发的等离子体隐身天线已经进入实际应用阶段^[109]。2005 年,美国敏带技术公司研制了一种先进的等离子体隐身天线,该天线的抗干扰射频技术是前所未有的^[110]。2006 年, S. Monmi 用频率选择表面来实现低频天线的 RCS 减缩^[111]。2007 年, Sanming 分别研究了 UWB 矩形缝隙天线和单极子天线的单站散射特性,但没有进一步提出减缩 RCS

的方法^[112]。除了美国,俄罗斯、澳大利亚、法国、英国等国家也在该领域做了不少工作。2008年,法国图卢兹的保罗萨巴蒂埃大学和阿尔卡特联合研究了高低频混合方法快速计算阵列天线的RCS^[113]等。2010年,Thakare Y. B等人设计了一种星形分形微带天线,该天线的尺寸相比于圆形微带参考天线的尺寸减小了50%的同时,也有效减缩了RCS^[114]。2011年,de Cos, M. E.等人设计了具有低RCS的组合人工磁导体结构,该结构同样可用于天线的RCS减缩^[115]。

国内在天线的RCS减缩方面也做了一些工作,目前研究的单位主要有:西安电子科技大学、中国科学院、北京航空航天大学、南京航空航天大学、北京交通大学、哈尔滨工程大学、中国科技大学、上海交通大学、西北工业大学、南京理工大学、东南大学、国防科技大学、电子科技大学、复旦大学和空军工程大学等单位。

(3) 从研究内容看,主要集中于低轮廓天线,特别是微带天线和窄带阵列RCS的缩减。西安电子科技大学的龚书喜教授及其团队通过分形^[116]、开槽^[117,118]、仿生^[119]、电阻加载^[120,121]、超材料^[122-124]等技术,减缩了天线的RCS,并对天线的散射相关理论做了一些有意义的研究^[5,7],图1.3为该团队在低RCS天线上运用的几种减缩技术。中国科学院空间科学与应用研究中心对等离子体天线进行了大量深入的理论和实验研究,已研制出鞭状等离子体天线原理样机^[125]。南京航空航天大学对有源相控阵天线的散射场进行了计算,并研究了馈电通道中移相器对有源相控阵天线散射特性的影响^[126]。北京交通大学李增瑞博士和王均宏教授对低轮廓天线及其阵列的散射特性及其RCS的相关减缩方法作了有益的研究^[127]。哈尔滨工程大学廖艳苹博士在RCS减缩方面提出了一种加载感应线圈实现RCS减缩的方法,该方法在共形天线馈电处加载可调电感来控制天线的谐振频率,从而控制RCS值^[128]。上海交通大学的何蔚博士将二阶共面紧凑型电磁带隙结构实现了于微带天线单元和阵列在2~18GHz的RCS带外显著减缩^[129]。西北工业大学丁君教授在微带天线的隐身设计等方面取得了一定的成果^[130]。东南大学洪伟教授将基片集成波导技术和频率选择表面技术应用于喇叭天线的RCS减缩,取得了良好的效果^[131]。国防科技大学袁乃昌教授将电磁带隙融合于脊波导缝隙天线阵的隐身技术研究中^[132]。北京航空航天大学通过PSS边界实现了Vivaldi天线阵列的RCS减缩^[133]。电子科技大学王秉中教授在微带阵列天线的低RCS研究方面也取得了较大的进展^[134]。空军工程大学在等离子

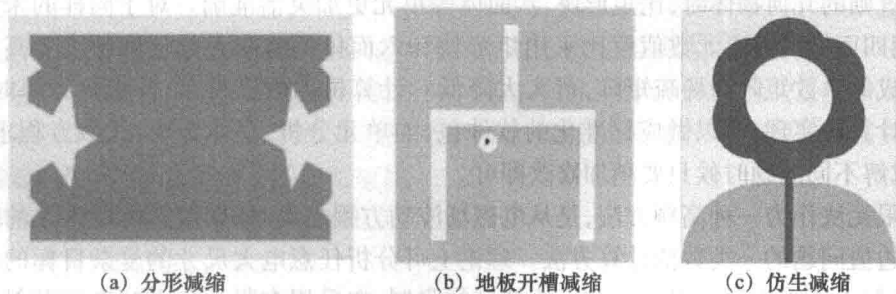


图1.3 各种方法减缩天线RCS

体天线隐身方面作了一些有益的尝试^[135,136]。另外,西安电子科技大学的洪涛博士设计了具有低 RCS 的双环 UWB 单极子天线,在宽带天线的 RCS 减缩方面作了有益的探索^[137,138]。王文涛博士将粒子群算法与矩量法相结合对阵列天线的方向图进行综合,有效降低了指定空域/频域内的 RCS 值,达到了抑制散射的目的^[139]。路宝博士研究了天线阵的散射特性,推导了阵列散射因子,并以此为基础,提出了减缩天线阵 RCS 的优化方法^[140~142]。

从天线 RCS 减缩的研究现状可以看出,国内外对天线的 RCS 研究都比较晚,还有许多值得深入研究和完善的地方,尤其是天线的带内隐身,由于要在宽的工作频带内同时兼顾辐射和散射特性,使得天线带内隐身最难实现。而对宽带天线和阵列的带内 RCS 减缩研究,相关文献则鲜见报道。因此,研究具有宽带特性和低 RCS 的天线和阵列,实现其辐射与散射综合设计,具有广阔的应用前景。

1.3 常用分析天线特性的数值方法

1.3.1 有限元法(FEM)

有限元法^[143~146]是近似求解数理边值问题的一种微分数值技术,最早由柯朗(Courant)于1943年提出,20世纪六七十年代被引入电磁场问题的求解中。有限元法数值处理的基本方法很有代表性,其基本方法完全适用于矩量法的情形。从数值分析和数值建模的角度看微分数值法是用差分代替微分,是数值的逼近,是变化意义上的近似;而积分数值法是用切分区域上的近似函数取逼近,因而积分法得到的平均意义上的近似解是函数意义上的近似。有限元法是用简单的子单元逼近的,是积木式的,每个子单元都用简单函数描述。求出的结果是小单元平均意义上的近似解。它是以变分原理和剖分插值为基础,近似求解数理边界问题的一种数值技术。该方法用多个子域代表整个连续区域,用插值后的函数表示子域内的场或位函数分布,具有高效、通用的优点,适用于任意介质填充、非均匀连续媒质和任何复杂的几何形状。20世纪80年代以后,棱边元单元(矢量有限元)的出现,解决了不连续界面非常难处理的问题。四面体单元在模拟任意形状的几何体,特别是不规则的几何物体时,比矩形块、六面体等单元更加灵活准确。对于同样的未知量数目,采用四面体的有限元数值解比采用矩形块和六面体的有限元数值解精度要高。由该方法生成的系数矩阵为稀疏矩阵,可大大降低对计算机的内存需求,并缩短计算时间,而且便于计算机实现,可以做成标准化的软件包,如单元分析、总体合成、代数方程求解、绘图等,求解不同问题时候只要稍加修改即可。

有限元法作为一种高频方法,是从电磁场波动方程出发,根据散射体所满足的边界条件求解边值问题的一类数值计算方法。理论上可分析任意电大尺寸的复杂目标的电磁散射问题,但由于受到计算机内存和运算速度的限制,在采用有限元法求解电磁散射和辐射问题时,需采用有限元法结合其他方法的混合技术分析电大尺寸复杂目标的电磁特性。

有限元法求解天线的电磁辐射与散射问题时,应将网格界定在有限区域内。因而需要在有限区域的边界上引入吸收边界条件,模拟无限远区域。常见的吸收边界有 PML 边界、Mur 边界、Liao 边界、辐射边界等。

1.3.2 矩量法(MoM)

矩量法^[147-149](Method of Moments, MoM)是一种经典的解非线性方程组的方法,是计算电磁学中最重要数值方法。矩量法求解方程的基本形式为

$$L(u) = F \quad (1.3)$$

式中: L 为线性算子; u 为待求函数; F 为激励源或激励函数。

矩量法用于求解天线问题的基本思想是:

(1) 将未知函数按照基函数 f_j 展开成级数和(即将连续的函数离散化),即

$$f = \sum_{j=1}^N \alpha_j f_j \quad (1.4)$$

(2) 通过对式(1.4)求内积运算可以构造求解系数 α_j 的方程组,权函数为 $\{w_i\}$,即

$$\langle w_i, Lf \rangle = \langle w_i, e \rangle, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (1.5)$$

(3) 将未知函数 f 的展开式(1.4)应用于式(1.5)得

$$\sum_{j=1}^N \alpha_j \langle w_i, Lf_j \rangle = \langle w_i, e \rangle \quad (1.6)$$

(4) 该方程组可以用矩阵形式表示为

$$[Z][A] = [E] \quad (1.7)$$

式中

$$Z_{ij} = \langle w_i, Lf_j \rangle$$

$$A_j = \alpha_j \quad (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N)$$

$$E_i = \langle w_i, e \rangle$$

(5) 求解上述矩阵方程可得待求系数为

$$[A] = [Z]^{-1}[E] \quad (1.8)$$

将求得的系数代入式(1.4)即可求出未知函数的数值解。

在应用矩量法进行计算时,关键是如何用尽可能小的矩阵得到尽可能快的收敛速度,并保证解的稳定性。基函数和权函数的选择对此起着重要的作用。

基函数分为两大类:全域基和分域基。全域基所需计算量小,收敛快,但是对于复杂形体的辐射体求解精度不高,所以其适用范围较小;分域基虽然计算量大,但是其对未知量的逼近精度高,目前得到了广泛的应用。

通常基函数的选择原则有如下几点:

(1) 满足问题的边界条件;

(2) 尽可能接近未知量的真解;

(3) 计算量小,收敛速度快。

权函数的选择原则是使内积所要求的计算量最小,求解速度快。一种最简单的权函数是采用脉冲函数,这种选择计算简单但是需要较多的采样点,使得计算量增大。

目前采用最多的是伽略金(Gakerking)法,即选择权函数和基函数形式相同,较多的是选择基函数与权函数均为分段正弦函数。这种选择方案求解收敛速度快,计算精度高,计算量相对较小,一般半波长的对称振子分5段就可以得到较好的精度。

在用 MoM 分析天线辐射和散射以及任意形状导体目标电磁散射特性的分析中总可以归结为 MoM 对导体目标表面感应电流的求解,通过求解感应电流,进而求得计算目标的其他物理量。基于 RWG 矢量基函数的三角面元的划分模型,可以计算任意形状金属导体的散射问题。计算机内存和计算量是用 MoM 法计算大型复杂目标电磁散射问题的两大瓶颈。基于矩量法的各种快速算法(如快速多极子方法(Fast - Multipole Method, FMM, 分块法)用于突破以上两大瓶颈。

分析微带天线的矩量法分两种:一种是基于分层介质的格林函数矩量法,该方法只需对天线结构进行划分,所需要的未知量少,计算省时;另一种是基于自由空间格林函数矩量法,该方法不需处理格林函数,操作简单,但所需要的未知数多,计算量大。

1.3.3 时域有限差分法

时域有限差分法(Finite - Difference Time - Domain Method, FDTD)是由有限差分法发展而来,直接由麦克斯韦方程对电磁场问题进行计算机模拟求解的一种数值算法^[150]。原则上,该方法可以处理任意复杂形状目标和非均匀介质物体的电磁散射、辐射问题。

1. 麦克斯韦微分方程的 FDTD 形式

麦克斯韦方程的旋度方程为

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - \sigma_m H \\ \nabla \times H = -\frac{\partial D}{\partial t} + \sigma_e E \end{cases} \quad (1.9)$$

假定空间无源且媒质参数不随时间变化,在直角坐标系中,电场和磁场可以分解为 x 、 y 、 z 3 个方向分量的微分形式,给出 E_x 和 H_x 标量方程如下:

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma_e E_x \right) \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \sigma_m H_x \right) \quad (1.11)$$

将问题空间沿 3 个坐标轴向分成多个网格单元,用 Δx 、 Δy 、 Δz 分别表示在 x 、 y 和 z 坐标方向的网格空间步长,用 Δt 表示时间步长,任意一个空间离散点和时间步的函数可表示为

$$F^n(i, j, k) = F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t), \quad i, j, k, n \text{ 为整数} \quad (1.12)$$

K. S. Yee 首次提出了一种对电磁场 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 分量在空间和时间上交替抽样的离散方式, 如图 1.4 所示。每一个 $\mathbf{E}$ (或 $\mathbf{H}$) 场分量周围有 4 个 $\mathbf{H}$ (或 $\mathbf{E}$) 场分量环绕, 将含时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程, 并在时间轴上逐步推进。

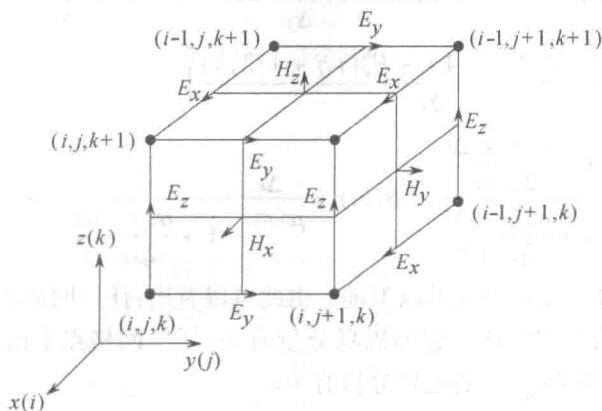


图 1.4 基本空间网格单元上场分量分布图

$\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 各分量空间节点选取如图 1.4 所示, 时间节点电场取值为整数个时间步, 磁场分量与电场分量相差半个时间步交叉抽样。

以求解 E_x 、 H_x 分量为例, 给出 FDTD 递推公式, 对于式 (1.10), 做如下差分离散:

$$\begin{aligned} & \frac{E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) - E_x^n(i+1/2, j, k)}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{\varepsilon(i+1/2, j, k)} \left[\frac{H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2, k)}{\Delta y} \right. \\ & \quad \left. - \frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k-1/2)}{\Delta z} \right] \\ & \quad - \sigma(i+1/2, j, k) \frac{E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) + E_x^n(i+1/2, j, k)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (1.13)$$

整理式 (1.13) 可得 E_x 场量递推公式:

$$\begin{aligned} E_x^n(i+1/2, j, k) &= CA(m) \cdot E_x^{n-1}(i+1/2, j, k) \\ &+ CB(m) \cdot \left[\frac{H_z^{n-1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n-1/2}(i+1/2, j-1/2, k)}{\Delta y} \right. \\ & \quad \left. - \frac{H_y^{n-1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n-1/2}(i+1/2, j, k-1/2)}{\Delta z} \right] \end{aligned} \quad (1.14)$$

$$\text{记号: } CA(m) = \frac{1 - \frac{\sigma_e(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}}{1 + \frac{\sigma_e(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}}, \quad CB(m) = \frac{\Delta t}{\varepsilon(m)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sigma_e(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}}, \quad m = (i+1/2, j, k).$$