

学校编码：10384
学号：34320141152809

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

学 位 论 文

基于 EGMPM 的阵列天线综合和基于变换光学的隐形斗篷研究

Synthesis of array antenna based on EGMPM and Research on invisible cloak based on transformation optics

李 晓

指导教师姓名：柳清伙 教授

专业名称：电子与通信工程

论文提交日期：2017 年 月

论文答辩时间：2017 年 月

学位授予日期：2017 年 月

答辩委员会主席：_____

评 阅 人：_____

2017 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

关于阵列综合问题，减少阵元数目是一个很重要的方向。在以往的研究中，已经有很多方法被应用于这个领域。关于某一类固定频率下的阵列天线的研究已经很多，然而在通常情况下，我们需要一种天线能完成多个天线能完成的复杂工作。对于一般均匀线性天线阵列来说，通过改变阵元的工作激励和相位可以使天线工作在几种模式下，但是这种阵列往往有着很大的孔径和阵元数，这给天线的硬件空间资源带来了很大压力，同时也导致了很大的冗余功率。为了对这类天线进行简化，优化阵元数，我们必须采用一定的方法来增强天线的工作效率（即对天线阵元进行优化）。矩阵束算法（MPM, Matrix pencil method）之前很多次被应用于数据处理，信号滤波，天线设计等方面，这也说明了 MPM 在阵列天线设计上必然有很大的前景。

本文旨在根据给定天线方向图和扫描情况的阵列天线数据，对已知的均匀阵列进行数据重构并最终达到减少阵元的目的。本文中的 EGMPM (Extended generalized matrix pencil method) 方法是在继承了 MPM、EMPM (Extended matrix pencil method)、GMPM (Generalized matrix pencil method)、FBMPM (Forward-backward matrix pencil method) 等方法的优点和特性后，为了得到最好的结果，我们还针对这些方法里的缺陷进行了改良。然而本文涉及的 EGMPM 的方法仍然有它独特之处：

(1) EGMPM 糅合了 FBMPM 方法增强了其在非对称波束阵列天线的综合问题上的适用性，提高了精度。

(2) EGMPM 解决了多频率多模式工作方式下的天线设计问题。

(3) 在综合过程中我们研究了频段、抽样率等因素对天线重构影响，得到的优化后结果具有了更快的计算速度，说明了 EGMPM 的计算复杂度较小。

在本文第二部分，我们介绍了变换光学和隐形斗篷理论，并阐述了隐形斗篷理论自创立以来，各种前沿研究的成果。由于最近几年的快速发展，隐形斗篷的理论革新很多，而其中不乏一些具有一定缺憾。本文在变换光学基础上，以二维圆柱剖面模型为实验载体，研究空间变换到材料变化过程中，讨论怎样来优化参数，增强隐形斗篷的性能和可实现性。

关键词：矩阵束算法；优化；隐形斗篷

厦门大学博硕士学位论文摘要库

ABSTRACT

For the question of array synthesis, reducing the number of arrays is a very important direction. In previous studies, many methods have been applied in this field. There are a lot of researches on a certain kind of frequency-invariant antenna array. However, under normal circumstances, we need a kind of antenna to complete the complex work of multiple antennas. For a uniform linear antenna array, by changing the work motivation and phase, elements of the antenna can work in several modes. But this always has a large aperture and more array elements, which not only has occupy the antenna hardware space which is not necessary, but also led to a lot of redundant power. In order to simplify the antenna and optimize the elements, we must adopt some methods to enhance the efficiency of the antenna (the sparse optimization of the antenna array element). The matrix pencil algorithm (MPM, Matrix pencil method) has been used in many fields such as data processing, signal filtering, antenna design and so on, which shows that MPM has a great prospect in the design of array antenna.

The purpose of this paper is to reconstruct the data of the known uniform array and to achieve the purpose of reducing the array according to the given antenna pattern and scanning array antenna data. In this paper, the EGMPM method is inherited in the MPM, EMPM(Extended matrix pencil method)、GMPM(Generalized matrix pencil method)、FBMPM(Forward-backward matrix pencil method) and other methods of the advantages and characteristics. In order to get the best results, we also address the shortcomings of these methods were improved. However, the EGMPM method involved in this paper still has its unique characteristics:

- (1) The EGMPM method combined with FBMPM enhances the applicability of the method in the synthesis of asymmetric beam array antennas, and improves the accuracy.
- (2) The EGMPM solves the problem of antenna design in frequency-invariant multi-pattern antenna operation.
- (3) In the integrated process, we studied the influence of frequency band, sampling rate and other factors on the reconstruction of the antenna. The optimized results have a faster calculation speed, which shows the less computational complexity of EGMPM.

In the second part of this paper, we introduce the theory of transformation optics

and cloak of invisibility, and discuss the achievements of all kinds of frontier research. Due to the rapid development in recent years, the theoretical innovation of the cloak of invisibility, and some of them have some shortcomings. Based on transformation optics, with a two-dimensional cylinder profile model of the carrier changes of space into the material process, some methods are used to optimize the parameters, step by step to enhance the performance and realization of the invisible cloak .

Key words : MPM ; optimization ; invisible cloak

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目录

第一章 绪论	1
1.1 矩阵束算法对于阵列天线的研究的意义, 现状以及发展	1
1.2 隐形斗篷的研究前景以及发展	4
1.3 论文内容与结构	7
第二章 矩阵束算法和隐形斗篷基本理论	7
2.1 矩阵束算法	7
2.2 隐形斗篷理论	11
2.3 本章小结	17
第三章 基于改进矩阵束方法的线性天线阵列综合	18
3.1 基于矩阵束的多模式工作方式下的线性天线阵列综合	18
3.2 基于矩阵束的多频率工作方式下的线性天线阵列综合	26
3.3 基于矩阵束算法的多频率-多模式工作方式下的天线阵列综合	33
3.4 本章小结	45
第四章 基于变换光学的隐形斗篷的研究	46
4.1 理想的隐形斗篷	46
4.2 改进的优化参数的隐形斗篷	49
4.3 本章小结	53
第五章 全文总结	54
参考文献	56
在学期间取得的与学位论文相关的研究成果	60
致谢	61

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The current situation and development of MPM for array antennas	1
1.2 The future and development of invisible cloak	4
1.3 Content and structure of the dissertation.....	7
Chapter 2 The MPM algorithm and invisible cloak algorithm.....	7
2.1 Matrix Pencil Method	7
2.2 Invisibility cloak theory.....	11
2.3 Summary	17
Chapter 3 Synthesis of linear antenna arrays based on EGMPM ..	18
3.1 Synthesis of multi-pattern mode antenna arrays based on matrix pencil method	18
3.2 Synthesis of frequency-invariant antenna arrays based on matrix pencil method	26
3.3 Multi-pattern frequency-invariant Antenna array synthesis based on matrix pencil method	33
3.4 Summary	45
Chapter 4 Study of invisible cloak based on optics transformation ...	46
4.1 Ideal cloak	46
4.2 Optimization parameters of invisible cloak	49
4.3 Summary	53
Chapter 5 Dissertation summary	54
Reference	56
Achievements related to the dissertation	60
Acknowledgements.....	61

第一章 绪论

本章内容包括三部分：第一部分（第一章）简述矩阵束算法对于阵列天线的研究的意义，现状以及变换光学在隐形斗篷研究的应用情况和前景。第二部分（第二章）简述了矩阵束算法和隐形斗篷的基本理论。第三部分（包括第三、四章）介绍了作者在本文中所做的主要工作。

1.1 矩阵束算法对于阵列天线的研究的意义，现状以及发展

天线是一种将导行波变换成在自由空间中传播的电磁波部件，也能够进行相反变换。在一般生产生活中，利用电磁波来传递信息的工作都需要天线来进行工作：无线电发射机输出的射频信号，通过馈线（电缆）输送到天线，再由天线以电磁波形式辐射出去，电磁波到达接收地点后，由天线接下来，并通过馈线送到无线电接收机。可见，天线是发射和接收电磁波的一个重要的无线电设备，没有天线也就没有无线电通信。天线品种繁多，以供不同频率、不同用途、不同场合、不同要求等不同情况下使用。对于众多品种的天线，进行适当的分类是必要的：按用途分类，可分为通信天线、电视天线、雷达天线等；按工作频段分类，可分为短波天线、超短波天线、微波天线等；按方向性分类，可分为全向天线、定向天线等；按外形分类，可分为线状天线、面状天线等^[1]。

天线应用最早是在长波远洋通信上，这时天线的主要发展集中在长波波段上。自 1925 年以后，中、短波无线电广播、通信开始逐渐应用，而后的各种中、短波天线得到迅速的发展。第二次世界大战中，雷达的应用促进了微波天线特别是反射面天线的发展，在这以后的 30 多年是无线电电子学飞速发展的时代，微波中继通信、散射通信、电视广播的飞速发展，特别是 20 世纪 50 年代后期，人类进入太空时代，对天线提出了许多新的要求，出现了许多新型天线。在实际的无线电系统中，为了完成特定的任务和提高工作性能，在电气上有的需要特殊波束的天线，有的需要天线有很强的方向性（很高的增益）。这是就要采取天线阵的方式来解决这类问题。阵列天线在雷达声纳，通信，电子对抗，地震波研究，射电天文等领域有着广泛的应用——如军事中的相控阵雷达技术，通信中的智能天线阵列技术，电子对抗中的超分辨率测向技术。阵列天线是由许多相同的单个天线按一定规律排列组成的天线系统，也称天线阵。阵列天线可分为：一般阵列、相位控

制阵列、自适应阵列和信号处理阵列。天线阵的主要参数为：阵元数、阵元的空间分布、各阵元的激励幅度和激励相位^[2]。

对于阵列天线，其阵元数和系统成本和设备复杂度成正比，且很大程度上影响天线的处理速度，所以对阵元的优化有着很重要的意义。对于天线设计者而言，应在保持天线孔径不变的情况下，尽量减少阵元数（即稀疏阵元）^[3]。而为了避免栅瓣，通常阵元位置是不均匀的，这样以来，天线不可避免地具有较高的旁瓣。为了达到天线综合的要求在天线优化过程中，重构的目标稀疏非均匀阵列应满足以下几个条件：

(1) 算法具有较高的效率和较小的计算复杂度，这在阵列天线的软件系统设计时对天线性能影响很大，一般算法需要能够使天线在一定时间内完成天线的初始化或者在几种工作方式下进行切换。

(2) 阵元数目维持在一定数目内，保证阵元的稀疏分布是天线优化的重要意义之一，与原始阵列相比，新的阵元一定要改善天线的硬件复杂度，这样能够控制硬件成本。

(3) 算法必须保证足够的重构精度，包括主瓣和副瓣的形变，方向图的误差。倘若只能保证主瓣不随频率改变，而副瓣变化很大，这样的结果是不合格的。

由于 20 世纪 90 年代以来，计算机技术的快速发展，许多十分复杂的算法得以在实验环境中实现，并得到广泛的应用。关于优化算法，已有的研究包括遗传算法^{[4][5][6]}，压缩感知^{[7][8]}，粒子群优化^[9]，滤波对角化^[10]，矩阵束方法^[11]已被应用于阵列天线的优化过程中。这些算法都各有优点，在精度，复杂度等因素上对以往的算法都有所继承和改良，这为阵列天线的设计提供了各种新颖的方向。

1) 遗传算法 (GA, Genetic Algorithms)

遗传算法属于进化算法 (Evolutionary Algorithms) 的一种,它通过模仿自然界的选择与遗传的机理来寻找最优解. 遗传算法有三个基本算子:选择、交叉和变异. 遗传算法与传统的优化方法 (枚举, 启发式等) 相比较, 以生物进化为原型, 具有很好的收敛性, 在计算精度要求时, 计算时间少, 鲁棒性高等都是它的优点. 遗传算法最初由 Goldberg 在 1989 年应用于天线综合, 其方法是按照一定概率将阵元稀疏在一行阵列孔径上, 将阵元位置信息二值化, 然后视为一个染色体进行选择、交叉、和变异. 然后计算天线旁瓣电平, 经过群体一代代优化, 最后选出旁瓣最小的染色体, 即为最佳阵元分布。

2) 压缩感知 (CS, Compressive Sensing)

只要信号是可压缩的或在某个变换域是稀疏的, 那么就可以用一个与变换基不相关的观测矩阵将变换所得高维信号投影到一个低维空间上, 然后通过求

解一个优化问题就可以从这些少量的投影中以高概率重构出原信号，可以证明这样的投影包含了重构信号的足够信息。压缩感知理论主要包括三部分：信号的稀疏表示；设计观测矩阵，要在降低维数的同时保证原始信号 x 的信息损失最小；设计重构算法，利用观测值无失真地恢复出原始信号。对于稀疏信号或可压缩信号来说，压缩感知理论作为一种新的信号获取方式，比传统的采样方式更加有效。

3) 滤波对角化 (FDM, Filtering Diagonalization Method)

该方法从期望的离散数据中抽取数据样本并将样本以虚拟动态系统的时间自相关函数的形式表示出来。这个系统包含一个复数形式的“哈密顿”算符以及特征值信息，它可以由一组正交特征向量分解。因此，原来信号重构问题则转化为解决 Krylov 基的奇异值分解问题。滤波对角化可以在缺少先验信息的情况下实现数据重构。

4) 矩阵束方法 (MPM, Matrix Pencil Method)

矩阵束方法是将原始数据构造成块矩阵，而后对矩阵特征值分解得到特征值，并利用阈值得到简化后的特征值序列，利用最小二乘得到幅度信息，进而完成对原信号重构。对于阵元较少的天线阵列，这种方法在计算复杂度上优于以上方法。在寻找阵元最优解的问题时，矩阵束方法对信号极点限制较小，且当缺少先验信息时，矩阵束方法有着良好的抗噪声性能。对于重构算法在天线阵列综合的应用中，有很多算法都拿来用以得到一个拥有更好性能，更少阵元的天线阵列，但是在算法效率和天线结构复杂性的优化中仍然不能得到一个应用与多频率和多模式的工作状态的天线阵列，大部分的方法都在尝试单一的线性阵列或者平面阵列的综合后就不再深究算法在该领域的潜力，因此频率和模式这两个有关天线类型的自由度将是一个优化天线过程中所应考虑的重要因素。借由这种启发，本文对以往矩阵束算法在新的领域应用扩展：基于矩阵束算法的多频率多模式天线阵列综合。以往矩阵束方法在多频率和多模式的天线设计中都是以单模式或单频率的形式下进行综合的。而本文方法可以使天线工作在不同模式和不同频率的情况。

1.2 隐形斗篷的研究前景以及发展

1999 年 R.M.Walser 提出“Metamaterial”（超材料）一词，它表示该材料超出一般自然界材料的特性，由人工制成的复合结构或材料，例如具有负的电磁参数的

左手材料”、零折射率材料、等离子超材料等。超材料的核心思想是在文献^[12]中由 J. B. Pendry 提出来。美国《科学》杂志将 Metamaterial 列入本世纪前 10 年的 10 项重要科学进展之一，超材料理论的创立影响了信息技术、国防工业、新能源技术等领域的发展。美国国防部更是将其列为“六大颠覆性基础研究领域”之一。近几年来，超材料理论的出现引起了一场科学界的变革，在世界各地的实验室里出现了很多前所未有的发明，而隐形斗篷就是其中一种。由于超材料的出现，变换光学为控制电磁波创造具有特殊设计特性的材料提供了极大的通用性。利用变换光学的功能，几乎可以设计任意器件的光学性能。而这种方法可以用来设计各种光学错觉效果的器件，如隐形斗篷。

电磁波的传播很大程度上由传输介质的折射率决定的，同一频率的电磁波在经过不同介质时会发生折射，而如果这些介质的电磁参数可以人工控制的话，那么就可以依据人的意愿控制电磁波的传播，从而能够实现各种创新的想法。但由于无法得到负折射率的材料来控制介质的参数变化，控制电磁波的效果就不能尽如人意。而超材料的出现就为隐形技术带来的光明，它能够通过对电磁参数的控制实现对折射率的控制，从而使电磁波绕过物体传播：当电磁波照射某物体时会有一部分光投射进入物体中，一部分由材料吸收，还有一部分被反射。倘若存在某种无损耗材料将物体包裹之后，光线能够在包裹材料中弯曲并绕过物体而后沿着入射光线延长线继续传播，这样以来在包裹材料中的光程和与之对应的自由空间的光程是相等的，假设包裹不存在反射，这样在光线观测点就无法察觉物体的存在，这些就是电磁波绕射的原理。以下是隐形斗篷所涉及的基本概念：

超材料：由于自然界不存在一些特定电磁特性的材料，需要人工结构来实现天然材料不具备的超常物理性质的复合材料。超材料是通过在多种物理结构设计来突破自然规律的限制。狭义上讲，超材料指的是左手材料（介电常数和磁导率是负值），广义上讲，其他诸如零折射率材料，光子晶体，超磁性材料，零折射率材料等都属于超材料范畴。

变换光学：2006 年，J. B. Pendry 和 U. Leonhardt 分别提出了变换光学理论，该理论基于麦克斯韦方程在伽利略变换中形式不变性，能够将空间和材料变换等效^[13]。可以通过选择合适的坐标变换来设计超材料以实现电磁波传播的控制，为实现各种新颖的功能器件提供对应的方法。变换光学表明，光的空间也可以几乎任意方式弯曲。最重要的是，光学空间可以被设计并实现。这种新的模式告诉人们如何使用超材料实现一些新的光学器件，以及预先设计和控制光学空间。

隐形斗篷：由变换光学理论得到的隐形斗篷的电磁参数是非均匀且各向异性的，并且带有磁性，人为实现起来比较困难（尤其对于光波频段）。但由于边界阻抗不

匹配，经过斗篷的电磁波仍然有明显的散射。实现隐形斗篷可以通过两种方案：非均匀各向异性单层结构和均匀各项同性以及非磁性材料来实现。

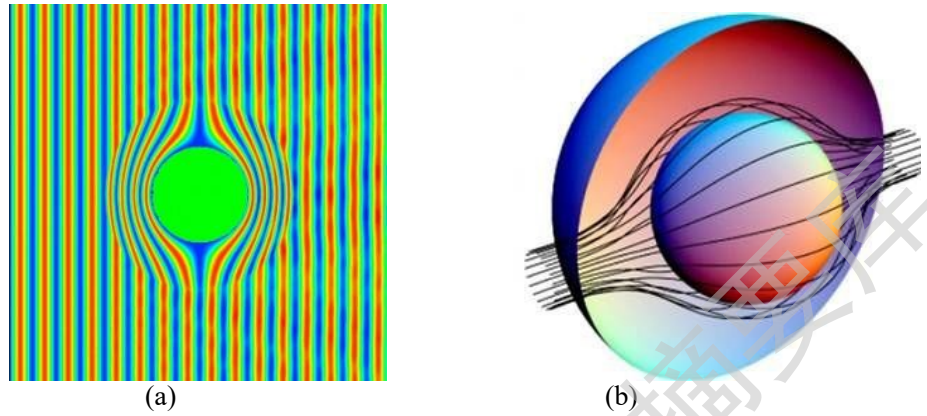
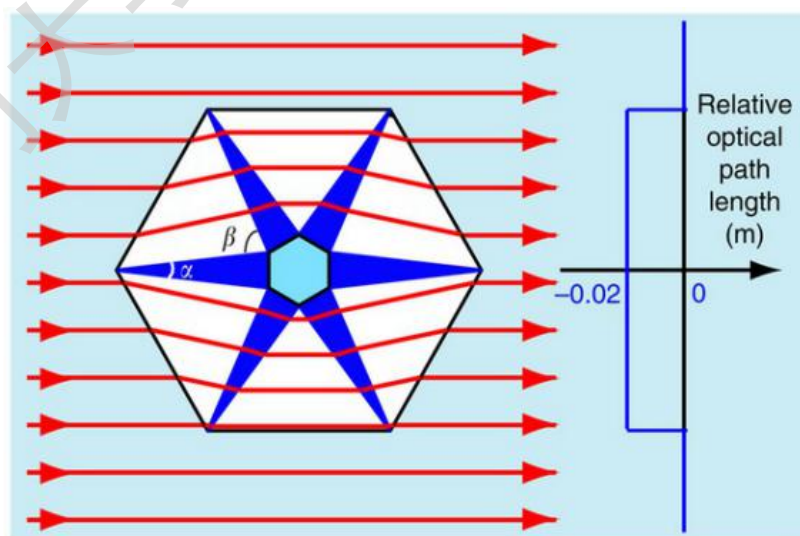
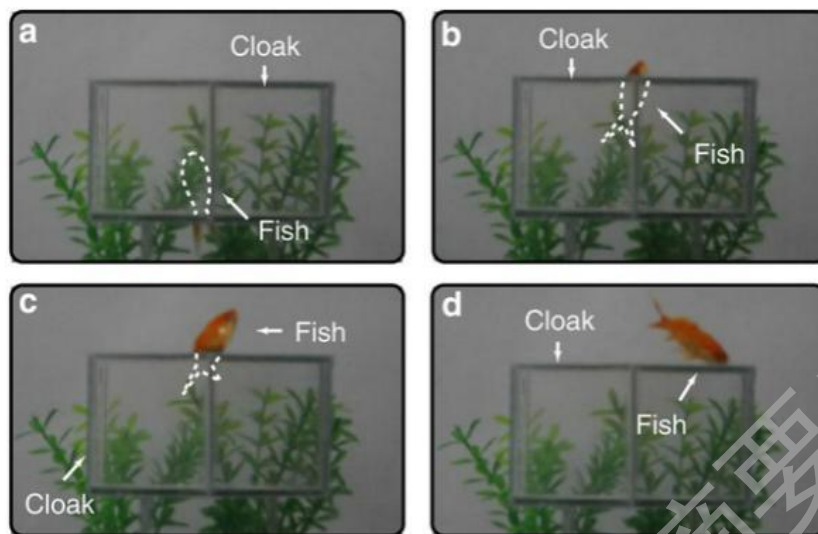


图 1.1 基于变换光学的隐形斗篷^[13]

现实生活中，光波段的隐身已经出现过一些新颖的研究，比如浙江大学的 chen 发明了正六边形隐身衣。这种隐形斗篷的原理如图 1.2 (a) 所示，实验结果如图 1.2 (b) 所示：金鱼在鱼缸中部的正六边形围成的空间中，能够得到隐身的效果，光纤会绕过这个空间进入观测者的视觉。这种隐身衣正是运用变换光学理论得到的，这种隐身衣结构简单，材料也更加普通，只采用玻璃、水和空气^{[14][15]}。相比之下，微波段隐身衣是采用超材料制成的，D.Schurig 通过简化的材料参数的方法在微波段实验中制作了 10 层 SRR(开口谐振环)结构组成的二维微波隐身斗篷^[16]，如图 1.3 所示。



(a)



(b)

图 1.2 (a) 正六边形隐身衣的光线轨迹^[14] (b) 正六边形隐身衣的实际效果^[14]

这些合成的结构可以提供所需的按空间分布而变化的介电常数和磁导率，这样以来就可以引导和控制在一个精心设计的空间中的电磁波的传播。我们不再受制于天然材料及其化合物的电磁特性。相反，我们还可以定制超材料结构单元所需的形状和大小，或调整其组成和形态，以实现新的功能。

1.3 论文内容与结构

本文阐述了在阵列天线综合和隐形斗篷两种截然不同领域中，矩阵束方法和变换光学理论作为理论工具，一步步解决问题的过程。本文的章节大致内容如下：

第一章为绪论，简要介绍了阵列天线综合与隐形斗篷研究的实践背景与理论背景。

第二章第一点包括矩阵束算法的介绍以及其他方法的特点分析，描述为什么选择矩阵束方法；第二点包括变换光学理论的以及隐形斗篷实现原理的阐述。

第三章提出天线的多模式多频率工作方式，并表明如何结合 EGMPM、FBMPM、MPM 等方法来解决这类综合问题。

第四章主要完成隐形斗篷设计的前沿工作，阐明了隐形斗篷设计的四个条件，为以后的隐形斗篷研究指明了具体的方向。

第五章为本文总结，对每章内容进行详细的概括，结合研究成果展望将来的研究方向。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库