

〔美〕 Ben A. Munk 著
侯新宇 译

Frequency Selective Surfaces
Theory and Design

频率选择表面 理论与设计



科学出版社
www.sciencep.com



频率选择表面理论与设计

〔美〕 Ben A. Munk 著

侯新宇 译

科学出版社

北京

图字: 01-2007-5609 号

内 容 简 介

本书是一本关于频率选择表面理论与设计的全面的、前沿的指导性著作。本书深入浅出地揭示了如何采取有效的步骤制造出各种不同类型的 FSS, 其中包括直至最近才获解密的混合雷达罩及其相关信息。本书的特点包括: ① 周期矩量法(PMM)的完整推导; ② 带通和带阻滤波器及其实际应用; ③ 电路模拟吸收体和功率击穿及其应用; ④ 大量的具有重要价值的 FSS 传输和反射曲线的结果; ⑤ 双层及三层 FSS 的设计过程; ⑥ 众多的实例、问题, 以及近 250 幅插图。

本书是从事电磁学、微波、天线、雷达, 以及隐身技术研究的众多研究机构和广大研究人员一本不可多得的参考书, 也可用作相关专业的研究生教材。

Frequency Selective Surfaces: Theory and Design/by Ben Munk.
Copyright © 2000 by John Wiley & Sons, Inc. All Rights Reserved. This translation published under license.

图书在版编目(CIP)数据

频率选择表面理论与设计/(美) Ben A. Munk 著; 侯新宇译. —北京: 科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-025742-0

I. 频… II. ① M… ② 侯… III. 频率检测 IV. TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 179906 号

责任编辑: 姚庆爽 / 责任校对: 钟 洋
责任印制: 赵 博 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 10 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)
2009 年 10 月第一次印刷 印张: 22 3/4
印数: 1—2 000 字数: 429 000

定价: 70.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

中译本序

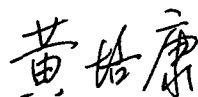
在安装有雷达传感器的各类飞行器(飞机、导弹与卫星等)上,都希望雷达天线罩在工作频段内实现低损耗传输,而在工作频段外像金属罩一样,与飞行器外形相赋形(Shaping),从而达到低雷达散射截面(RCS)的目的,构成各类隐身飞行器。这种特殊的天线罩就是利用“频率选择表面”理论设计与研制的。频率选择表面是一种空间滤波器,它可作为雷达天线的带通天线罩,也可作为无线通信双频天线的双工器,又可作为特定通带的吸波结构件等。频率选择表面理论与技术发展已有半个多世纪的历史,它还促进了相控阵天线设计技术的发展。

美国俄亥俄州立大学 Ben A. Munk 教授所著的《频率选择表面理论与设计》(*Frequency Selective Surfaces Theory and Design*)一书是这一专业领域迄今最权威的一部专著。这是他潜心研究 30 年的成果结晶,他成功地将周期结构矩量法与平面波展开谱域法巧妙地结合起来,解决了周期结构体散射与透射的精确计算,并从“分析”的观点出发,对繁杂的数学求解给予了清晰的物理解释,体现了作者对周期结构体电磁散射、透射的深刻理解。具体到工程设计上,通过计算习题或专题来阐述诸如带内平顶、带边陡截止和带外副瓣等参数的设计技巧,解释散射与入射角、极化与表面形状的关系等。书中多处提醒并纠正读者可能出现的一些错误概念。由于一些非技术原因,书中未引入实验验证结果,但作者特意提到全书的许多理论计算结果是得到实验结果证实的,并已经应用到实践中。

本书译者侯新宇教授曾作为访问学者赴俄亥俄州立大学电子科学实验室进修,有幸得到 Ben A. Munk 教授的悉心指导。侯新宇教授长期从事电磁散射理论计算的研究和教学,由于他熟悉这门专业,因此本书的中文翻译质量是很高的。我相信中译本的出版将有益于从事电磁散射、雷达天线罩研究的同行们,为此,我竭力推荐。

Ben A. Munk 教授一直很关注本书中译本的出版,非常可惜他于今年 3 月不幸逝世,请转告他的家属,我们中国的同行们对他表示深深的敬意和感谢。

中国工程院院士
“目标与环境电磁散射辐射”重点实验室
学术委员会主任



于中国北京

二〇〇九年十月十二日

序 I

20 世纪 50 年代初, 空军航空电子实验室^①曾经致力于飞机特征的量化研究, 也就是现在我们所知道的雷达散射截面 (RCS) 或雷达回波面积。自第二次世界大战以来, 这个问题的答案一直未被找到。为了进行计算与测量, 必须知道怎样建立一个合适的模型, 这意味着必须找出 RCS 的主要特征。在此期间, 大量的这种“回波源”被识别出来。因为有了这个基础, 我们继而建立了各种军用飞行器的 RCS 模型及其常规分类。

在此研究过程中, 关于主要回波源的雷达尺寸有可能得到缩减的想法逐渐成熟起来。由此引发了雷达特征缩减项目的研究。若干年来, 在国防部的这项工作中, 航空电子实验室一直处于领先的地位。但它显然没有足够的人力资源在室内研究的同时观察到对每一种回波源的处理, 因为这些研究涉及多种需要长期积累的技术。只有在多家研究机构的协助下, 才能达到当前的技术水平。

雷达回波减缩的工作重点最先被放在雷达吸收材料 (RAM) 的研究上 (看起来将对方雷达的入射信号吸收掉是个很好的想法)。我们研究的一种特殊类型的 RAM 被称为电路模拟吸收体, 之所以如此命名是因为这种材料的特性依赖于其内部由导电材料构成的分层几何阵列, 而这些阵列起到电阻、电容和电感等电路元件的作用。本书的第 9 章对这些问题进行了细致的论述。

与此同时, 一种非常重要的回波源的识别, 即大多数飞行器上的大型天线在其鼻锥方向的特征如此显著, 给我们的工作带来了很大的挑战。问题是, 我方 (“好人”) 的天线只需要在某个窄频范围内工作, 而它却在敌方任意选用的频率上成为一个很大的回波源。显然, 在它的表面覆盖 RAM 可以减少其雷达回波, 但我们感到我们周围有些人并不是很喜欢这个主意。然后 (大约在 20 世纪 50 年代后期), 我们想到了有可能使用有点类似于电路模拟吸收体中的电阻元件的 “高 Q” (高导电性) 单元。这种想法是用一个只对窄带频率反射的表面取代传统的对所有频率都反射的金属表面, 这很大程度地限制了天线有可能成为回波源的频率范围。

这一时期, 俄亥俄州立大学电子科学实验室 (ESL) 在 RCS 研究方面为航空电子实验室提供了主要的协助。由于主要努力方向似乎应该针对 “谐振表面” 概念的深入, 因此航空电子实验室指定 ESL 对它进行重点研究。在最初的一段时间里, 研究进展非常缓慢, 而且似乎希望渺茫。这其中一部分原因是 OSU 的某些关键人物

^① 这些年来, 很多机构的名称经常改变, 这里我沿用大家最熟悉的名称。

对此概念持怀疑态度，另外也有一部分原因是在研究方法上很容易陷入复杂数学计算（矩量法）的泥潭。在经历了一年，甚至更长时间的困扰之后，随着 Ben Munk 的加入，及他的电磁学博士论文的接近完成，这种状况有了根本的改变。Ben 就像一缕清新的空气，我们这么说一点也不为过。

Ben 很快采取了不同的研究策略，他使用阵列理论结合具体的矩量法（本书所介绍的周期矩量法）宏观而非微观地去解决问题，取得了令人惊奇的成果，这种概念的潜力随后成为了后续支持其研究的源动力。

从那以后，Ben 一直是这项技术的世界级大师，他提供了对各种应用的支持。他的天才之处在于在应对非常复杂的数学问题的同时，充分领会到了其结果对实际应用的重要性。从这本书中可以清楚地看到，Ben 能使初学者对使用频率选择表面产生浓厚的兴趣，他用易懂的方式介绍技术细节，字里行间透露出独特的幽默感。

这些年来，有很多人认识到了这方面研究的重要性，并不断地基于“高等”数学分析发表了很多各自的观点。通过解这些方程能够得出新的有趣的理论，但大多数的出版物都没有什么实际的用途。只有对真实世界有了了解，数学才能提供真正有用的结果。恰如 Ben Munk 的这本书中所展示的，他和他指导的团队正是这样做的。书中大量的关于“常见错误概念”以及不多但非常重要的要素，如“介质内衬”的讨论，充分证明了他对这项技术运用的精通（还有他超凡的幽默感）。

无可置疑，Ben Munk 的这本著作集中体现了他对频率选择表面的深入理解。关于这项成就，他对授予他的任何荣誉都是当之无愧的（毫无疑问，我会非常乐于继续支持他以后的工作）。

William F. Bahret



William F. Bahret 简介：

曾就职于美国空军，现已退休。早在 20 世纪 50 年代初，由他发起了大量有关飞行器雷达散射截面项目的研究，尤其是在天线和吸收体方面。在他的带领下，诞生了许多至今仍在广泛应用的概念，金属雷达罩便是其中之一。事实上，他是公认的隐身技术之父。

B.A.M.

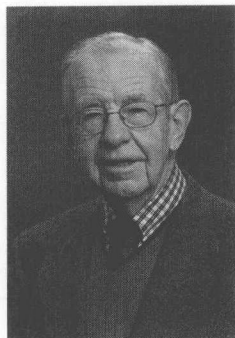
序 II

早在 1947 年，俄亥俄州立大学天线实验室（电子科学实验室的前身）的创始人 George Sinclair，便认识到飞行器上的天线是一种重要的散射源。Ed Kennaugh 随后领导开展了大多数有关天线雷达散射截面控制的研究工作。这方面的研究始于 1961 年的一篇白皮书《天线的回波面积》。频率选择表面作为其中引入的概念之一，随后很快上升为研究的主题，并且一直延续至今。由于 Kennaugh 当时主要专注于瞬态散射和类似的复杂自然谐振等研究，因此他提出不再负责这些项目的研究。其结果是，1965 年实验室的领导指定我接替他的工作。这对我来说是件很幸运的事情，因为我很快得到了许多出色学生的协助。其中便有 Ben Munk 和 Randy Ott 两位博士，他们都专攻频率选择表面的分析，并且都很成功。但我们的赞助人 (Bill Bahret) 指出：“我不需要两个解，就像海龟不需要气刹一样”。Randy 在研究中较多地使用了传统电磁计算的矩量法；而 Ben 从研究伊始，就观点独特，他在求解中融入了单元之间相互影响这一基本的物理现象。我们四个人（我，Randy，Ben，Bill）都同意 Ben 的方法，也就是他在本书中所使用的方法，它是适用性最强，因而也最为有用的方法。历史证明，我们作出了正确的选择。自从将物理概念深深植入频率选择表面的分析之后，他的方法为许多后续的 FSS 结构提供了有用的结果，这些工作在他之前的研究中甚至从未有人考虑到。Ben 在获得博士学位几年后接替我成为这项研究的负责人，至今仍是 FSS 研究领域的领袖。

我对本书的写作过程有一些小小的评论。Ben 在丹麦接受过教育的背景对他的写作曾经有非常强的影响。他的博士论文和后来的研究报告都组织得很好，而这本书的组织比他以前的工作还要出色。但对我来说不幸的是，他经常在一个单词需要重复某个字母时只写一个，或者在只需要一个字母时写两个。这使我有时不得不去图书馆去查阅某些单词的正确拼写。通过这本书可以看出，Ben 已经掌握了拼写课程，因为在他现在的工作中已经再也看不到那些早期的拼写错误了。

这本书是他过去 30 年间大部分研究成果的集中体现。整本书将他业已获得并随其研究生涯深入发展的物理洞察力凝为一体。Ben 对数学方法的使用在任何需要的范围内都非常恰如其分。

本书的编写非常有益于电磁背景的工程师，我特向对周期阵列或频率选择表面有兴趣的所有工程师竭力推荐。从本书中获得的物理洞察力会大大增强他们处理其他阵列问题的能力。



Leon Peters Jr. 简介:

俄亥俄州立大学退休教授。自 20 世纪 60 年代初期开始致力于天线和雷达吸波结构 RCS 问题的研究。事实上,当我在 60 年代中期加入研究小组时,他曾是我的导师。

B.A.M.

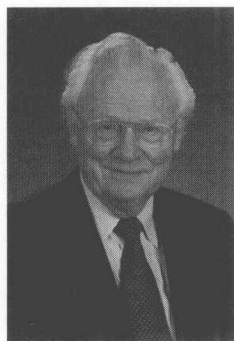
前 言

本书向读者展示了我和我的同事及学生自 20 世纪 60 年代中期至今以来的大部分工作，这些工作大都曾被归类为秘密。事实上甚至连我在 1968 年完成的博士论文也被归类为秘密。幸运的是，现在很多 (但不是全部) 限制已被撤销，因此我很高兴有机会出版本书。

本书所涉及的大部分工作曾得到美国空军的长期资助，而最后几年的资助则主要来自美国海军。本书的形成正源于此。

Ben A. Munk

1999 年 11 月



作者简介：

Ben A. Munk, 博士, 美国俄亥俄州立大学电气工程系教授, 现已退休。他是周期结构 (特别是频率选择表面、电路模拟吸收体和相控阵) 理论和设计的主要贡献者。

致 谢

多年来, 很多人曾给予作者极大的支持和鼓励, 这里无法一一列出他们的名字。但下面几位却是不得不提的。首先要感谢 William F. Bahret 先生, 以及 Leon Peters Jr. 博士和 Robert Kouyoumjian 博士。毫无疑问, 他们三人在隐身技术方面对作者产生了非常巨大的影响。接下来, 还要感谢 Carl Mentzer 博士, 以及 Brian Kent 博士和 Ed Utt 先生。

起初美国空军对带通滤波器非常关注, 后来美国海军却对带阻滤波器的设计更有兴趣。在这些方面, Jim Logan 先生, 以及 John Meloling 博士和 John Rockway 博士给了作者巨大的、有价值的指导和支持。

感谢 Marion Composite 公司 (以前是 Brunswick 公司) 的好朋友 Clyde L. Hoots 先生, 他向作者传授了很多关于雷达罩设计的实际经验。

同样感谢好友和同事 John Kraus 教授多年不断地对作者的鼓励与建议。

这些年的工作得到了许多学生的协助, 他们中有些人的名字将在本书中提到。特别要感谢 Ethan Saladin 先生和 Jonothan Pryor 先生, 以及 Dan Janning 先生在计算方面给予的帮助。作者还得益于 EE910 班的学生们, 他们帮忙纠正了很多初稿中的错误, 并给出了大量好的建议。

最后对打印了本书全部手稿的 Ann Kelly 小姐以及绘制了其中所有插图的 Jim Gibson 先生表示感谢, 他们的工作是一流的。

B.A.M.

符号及定义

a	q 列和观察点 R 的水平距离
a, a_1	单元的线半径
a	正方形单元的边长
$d\mathbf{A}$	赫兹单元双无限大阵列的矢量位
$d\mathbf{A}_q$	位于 q 列的赫兹单元的矢量位
$d\mathbf{A}_{qm}$	位于 m 行 q 列上单赫兹单元的矢量位
b_{m-1}	偶极子情况下介质栅 m 的前分界面的位置
b_m	偶极子情况下介质栅 m 的后分界面的位置
C_p	电路模拟吸收体中正交单元的等效分路电容
d	圆形单元的直径
d_m	偶极子情况下介质栅的厚度
D_N	N 个缝隙阵的阻抗矩阵的行列式
D_x	x 方向内部单元间距
D_z	z 方向内部单元间距
$\mathbf{e} = [\mathbf{p} \times \mathbf{r}] \times \mathbf{r} = \perp \mathbf{n} \perp \mathbf{e} + \parallel \mathbf{n} \parallel \mathbf{e}$	赫兹单元所形成的无限大阵列的场矢量
$\mathbf{E}_m(\mathbf{R})$	在媒质 m 中 \mathbf{R} 处的电场
$\mathbf{E}_m^i(\mathbf{R})$	在媒质 m 中 \mathbf{R} 处的入射场
$\mathbf{E}_m^r(\mathbf{R})$	在媒质 m 中 \mathbf{R} 处的反射场
f	频率
f_g	栅瓣的开始频率
$F(w)$	$f(t)$ 的傅里叶变换, 不一定是时间的函数
$\mathbf{H}_m(\mathbf{R})$	在媒质 m 中 \mathbf{R} 处的磁场
$\mathbf{H}_m^i(\mathbf{R})$	在媒质 m 中 \mathbf{R} 处的入射磁场
$\mathbf{H}_m^r(\mathbf{R})$	在媒质 m 中 \mathbf{R} 处的反射磁场
$H_n^{(2)}(x)$	第二类汉克尔函数, 阶数 n , 变量 x
$I_{qm}(l)$	沿着 m 行 q 列处单元的电流
k, n	无限大阵列非均匀平面波谱的指数
l	从参考点到单元上任意点的距离
$2l_1$	单元总长度
dl	单元长度的微元
Δl	赫兹偶极子的单元长度

$\mathbf{m}_{\pm} = \mathbf{E} \times \mathbf{n}_{D\pm}$	磁流密度
\mathbf{M}_{\pm}	缝隙的总磁流
\mathbf{n}_D	垂直于介质分界面的单位矢量, 指向媒质
$\perp \mathbf{n}_m = \frac{\mathbf{n}_D \times \mathbf{r}}{ \mathbf{n}_D \times \mathbf{r} }$	垂直于入射面或介质 m 反射面的单位矢量
$\parallel \mathbf{n}_m = \perp \mathbf{n}_m \times \mathbf{r}$	平行于入射面或介质 m 反射面的单位矢量
n, n_0, n_1, n_2, \dots	整数
\mathbf{p}	单元的位置矢量
$\mathbf{p}^{(p)}$	单元 p 部分的位置矢量
$\mathbf{p}^{p,n}$	在阵列 n 中, 单元 p 部分的位置矢量
$P^{(p)}$	和单元 p 部分相关的散射模式函数
$P^{(p)t}$	和单元 p 部分相关的传播模式函数
$P_m^{(p)}$	在媒质 m 中, 和单元 p 部分相关的散射模式函数
$\perp P_{m\pm}^{(p)} = \mathbf{p}^{(p)} \cdot \perp \mathbf{n}_{m\pm} P_{m\pm}^{(p)}$	在媒质 m 中, 散射模式的垂直分量和平行分量
$P_m^{(p)t}$	在媒质 m 中, 和单元 p 部分相关的传播模式函数
$\perp P_m^{(p)t} = \mathbf{p}^{(p)} \cdot \perp \mathbf{n}_{m\pm} P_{m\pm}^{(p)t}$	在媒质 m 中, 传播模式的垂直分量和平行分量
\mathcal{P}_n	由 n 个缝隙阵组成的带通滤波器的多项式
q, m	m 行 q 列所在单元的位置
$\mathbf{r}_{\pm} = \mathbf{x}r_x \pm \mathbf{y}r_y + \mathbf{z}r_z$	无限大阵列平面波谱的方向矢量
$\mathbf{r}_{m\pm} = \mathbf{x}r_{mx} \pm \mathbf{y}r_{my} + \mathbf{z}r_{mz}$	在媒质 m 中, 无限大阵列平面波谱的方向矢量
$r_{\rho} = \sqrt{1 - \left(s_z + n \frac{\lambda}{D_z}\right)^2}$	$\mathbf{r}_{m\pm}$ 的 ρ 分量
$\mathbf{s} = \mathbf{x}s_x + \mathbf{y}s_y + \mathbf{z}s_z$	入射场的方向
$\mathbf{s}_m = \mathbf{x}s_{mx} + \mathbf{y}s_{my} + \mathbf{z}s_{mz}$	媒质 m 中入射场的方向
t	用于泊松求和公式里的变量
$\perp T_m$	厚度为 d_m 的单个介质片的垂直或平行传输函数
$\parallel E \perp T_m$	厚度为 d_m 的单个介质片的垂直或平行的电场传输函数
$\parallel H \perp T_m$	厚度为 d_m 的单个介质片的垂直或平行的磁场传输函数
$\perp T_{m-m'}$	从厚度 d_m 的介质片到另一厚度 $d_{m'}$ 介质片的垂直和平行传输函数, 两种媒质均位于一般分层媒质中
T.C. $_{\pm 1}$	在 $Y_{\pm 1}$ 处的传输系数
$V^{1',1}$	由 $\mathbf{R}^{(1)}$ 的参考单元的阵列上的所有电流引起 $\mathbf{R}^{(1')}$ 参考点外部单元的感应电压

$V_{Di\pm}^{(1')}$	由整个阵列上的波直接引起 $R^{(1')}$ 参考点外部单元的感应电压
$V_{D\pm}^{(1')}$	在 \pm 方向结束的双反弹模所引起的 $R^{(1')}$ 参考点外部单元的感应电压
$V_{S\pm}^{(1')}$	在 \pm 方向结束的单反弹模所引起的 $R^{(1')}$ 参考点外部单元的感应电压
w	偶极子或缝隙的宽度
$\perp W_m$ \parallel	厚度为 d_m 的单介质栅 Wronskian 的垂直和平行分量
$\perp W_m^e$ \parallel	一般分层媒质中厚度为 d_m 的单层介质栅有效 Wronskian 的垂直和平行分量
Y	本征导纳
y	式 (6.29) 所定义的变量
$y_{1\pm}, y_{2\pm}, \dots$	带通滤波器的多项式的根
Y_A	阵列单元终端的扫描导纳
Y_L	单元终端的负载导纳
$Y_0 = \frac{1}{Z_0}$	自有空间的本征导纳
$Y_m = \frac{1}{Z_m}$	介质 m 中的本征导纳
$Y^{1,2}$	阵列 1 和阵列 2 间的阵列互导纳
Z	本征阻抗
$Z = \frac{a + bz}{c + dz}$	非独立变量, 是在双线性变换中独立变量 z 的函数
$Z_0 = 1/Y_0$	自有空间的本征阻抗
$Z_A = R_A + jX_A$	阵列单元终端的扫描阻抗
Z_L	单元终端的负载阻抗
$Z_m = 1/Y_m$	介质 m 的本征阻抗
$Z^{n,n'}$	阵列 n 和双无限大阵列 n' 的参考单元间的阵列互阻抗
$Z^{q,q'}$	q 列和 q' 的无限大线性阵列的参考单元间的列互阻抗
$Z_{q,q'm}$	q 列的参考单元和 q' 列单元 m 的互阻抗
α	入射面和 xy 面的夹角
$\beta_m = \frac{2\pi}{\lambda_m}$	介质 m 中的传播常数
Δl	赫兹偶极子的总单元长度
ϵ	介电常数
ϵ_{eff}	影响谐振频率的薄介质栅的等效介电常数
ϵ_m	介质 m 的介电常数

ϵ_{rm}	介质 m 的相对介电常数
η	侧面的入射角
η_g	侧面栅瓣方向的角度
θ_m	介质 m 侧面的入射角
$\Gamma_{m+}^{\perp} = \Gamma_{m,m+1}^{\perp}$	当波从介质 m 入射到介质 $m+1$ 时, 垂直和平行电场菲涅尔反射系数
$\Gamma_{m+}^{\parallel} = \Gamma_{m,m+1}^{\parallel}$	当波从介质 m 入射到介质 $m+1$ 时, 垂直和平行磁场菲涅尔反射系数
$\Gamma_{m+}^e = \Gamma_{m+1}^e$	当波从介质 m 入射到介质 $m+1$ 时, 垂直和平行的有效电场反射系数
$\Gamma_{m+}^h = \Gamma_{m+1}^h$	当波从介质 m 入射到介质 $m+1$ 时, 垂直和平行的有效磁场反射系数
λ_m	介质 m 中的波长
μ_m	介质 m 中的磁导率
μ_{rm}	介质 m 中的相对磁导率
$\tau_{m+}^{\perp} = \tau_{m,m+1}^{\perp}$	当波从介质 m 入射到介质 $m+1$ 时, 垂直和平行电场菲涅尔传输系数
$\tau_{m+}^{\parallel} = \tau_{m,m+1}^{\parallel}$	当波从介质 m 入射到介质 $m+1$ 时, 垂直和平行磁场菲涅尔传输系数
$\tau_{m+}^e = \tau_{m,m+1}^e$	当波从介质 m 入射到介质 $m+1$ 时, 垂直和平行的有效电场传输系数
$\tau_{m+}^h = \tau_{m,m+1}^h$	当波从介质 m 入射到介质 $m+1$ 时, 垂直和平行的有效磁场传输系数
$\omega = 2\pi f$	角频率
$\omega_1 \omega_0$ 和 ω_1	用于泊松求和公式的变量 (不是角频率)

目 录

中译本序

序 I

序 II

前言

致谢

符号及定义

第 1 章 综述	1
1.1 什么是周期表面	1
1.2 无源阵列与有源阵列的对比	2
1.3 偶极子阵列与缝隙阵列的对比	2
1.4 互补阵列	3
1.5 一段有关物理认知的简短历史	4
1.6 如何对谐振曲线“整形”	8
1.6.1 无介质的级联周期表面	8
1.6.2 有介质衬底的单层周期表面	8
1.6.3 真正的混合周期结构	9
1.7 周期结构的应用	12
1.7.1 混合雷达罩	12
1.7.2 带阻滤波器	12
1.7.3 二色性副反射面	13
1.7.4 二色性主反射面	15
1.7.5 电路模拟吸收体	15
1.7.6 曲折线极化器	17
1.8 常见错误概念	18
1.9 栅瓣	20
1.10 问题	21
第 2 章 不同类型的单元及其比较	22
2.1 引言	22
2.2 第 1 类: 中心连接单元 (N 极单元)	24
2.2.1 “Gangbuster” 表面	24

2.2.2	非加载的三极子阵列	27
2.2.3	锚形单元	29
2.2.4	耶路撒冷十字形单元	29
2.2.5	方形螺旋单元	31
2.3	第 2 类: 环状单元	32
2.3.1	四腿加载单元	32
2.3.2	三腿加载单元	37
2.3.3	六边形单元	40
2.4	第 3 类: 实心单元	43
2.5	第 4 类: 组合单元	47
2.6	关于单元的一些常见错误概念	48
2.6.1	阵列与单元影响相比	48
2.6.2	带宽相对于单元宽度	50
2.7	不同单元的比较	50
2.8	问题	51
第 3 章	评估周期结构: 综述	54
3.1	引言	54
3.2	一维无限大结构	56
3.3	二维无限大结构	60
3.4	示例	62
3.5	常见错误概念	63
3.6	关于算法的总结	65
3.7	问题	65
第 4 章	一维和二维周期结构的谱展开	68
4.1	引言	68
4.2	任意 p 方向排列赫兹单元一维列无限大阵列矢位 dA_q	69
4.3	任意方向 p 排布的赫兹单元双无限大阵列的矢位 dA	71
4.3.1	矩形栅格	71
4.3.2	倾斜栅格	73
4.4	任意方向 p 排布的赫兹单元双无限大阵列的矢量场 $dH(\mathbf{R})$ 和 $dE(\mathbf{R})$	73
4.5	给定任意方向 $p^{(1)}$ 排布单元的电流分布 $I(l)$ 双无限大阵列的矢量场 $E(\mathbf{R})$	74
4.6	物理解释	76
4.7	线天线上的感应电压	81

4.7.1	单个平面波	81
4.7.2	平面波谱	82
4.8	更多的物理方面的探讨	85
4.8.1	实空间: r_y 是正实数	85
4.8.2	虚空间: r_y 是负虚数	86
4.9	区域 II	86
4.10	单个单元和阵列的自阻抗	87
4.11	示例	89
4.11.1	例 I: z 向单元阵列的散射	90
4.11.2	例 II: 对 R_A 的研究	92
4.11.3	例 III: Γ 随扫描角的变化	93
4.11.4	例 IV: 作为扫描角度函数的扫描阻抗 Z_A : 表面波	94
4.12	任意形状的平面单元	96
4.12.1	源于分段单元阵列的总辐射场	96
4.12.2	分段单元上的感应电压	97
4.12.3	分段单元阵列互阻抗 $Z^{1',1}$	98
4.13	一些错误概念	99
4.13.1	平面波展开的解释	99
4.13.2	电流分布	99
4.13.3	单位单元的概念	100
4.13.4	单元段的长度	101
4.14	小结	101
4.15	问题	102
第 5 章	分层媒质中的偶极子阵列	106
5.1	引言	106
5.2	平面波入射到介质分界面	106
5.3	处于无限大媒质中的阵列和外部单元	108
5.4	半无限大媒质中的阵列和外部单元	109
5.5	介质片中的阵列和外部单元	110
5.6	反弹模式的构造	110
5.6.1	沿 $-y$ 方向的单弹跳模	111
5.6.2	沿 $-y$ 方向的双弹跳模	113
5.6.3	沿 $+y$ 方向的单弹跳模	113
5.6.4	沿 $+y$ 方向的双弹跳模	114
5.7	$\pm y$ 方向波的感应电压 $V_{\text{Tot}+}^{(1')}$	115