

装备科技译著出版基金

Modern Lens Antennas for
Communications Engineering

现代通信工程 透镜天线

[美] 约翰·桑顿 (John Thornton)

黄高成 (Kao-Cheng Huang)

葛海龙 刘旭光 刘敏 等译
汪连栋 审

著

WILEY



IEEE



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

现代通信工程透镜天线

Modern Lens Antennas for Communications Engineering

[美] 约翰·桑顿 (John Thornton)

黄高成 (Kao - Cheng Huang) 著

葛海龙 刘旭光 刘敏 等译

汪连栋 审

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-129 号

图书在版编目(CIP)数据

现代通信工程透镜天线 / (美) 约翰·桑顿
(John Thornton), (美) 黄高成(Kao - Cheng Huang) 著;
葛海龙等译. —北京:国防工业出版社, 2016. 7
书名原文: Modern Lens Antennas for
Communications Engineering
ISBN 978 - 7 - 118 - 10190 - 4

I. ①现… II. ①约… ②黄… ③葛… III. ①透镜天
线 IV. ①TN821

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 188559 号

Translation from the English language edition: Modern Lens Antennas for Communications
Engineering by John Thornton and Kao - Cheng Huang.

Copyright © 2013 by Institute of Electrical and Electronics Engineers. All rights reserved.

Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Published simultaneously in Canada.

All rights reserved. This translation published under John Wiley & Sons. No part of this book may be
reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 14 字数 270 千字

2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 66.00 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

译者名单

主 审 汪连栋

主 译 葛海龙

翻 译 刘旭光 刘 敏 崔 永 张涛涛

王倡文 宋颖凤 王满喜

译者序

在通信应用技术中,天线技术扮演着十分重要的角色。透镜天线是一种能够通过电磁波,将点源、线源的球面波或柱面波转换为平面波,从而获得笔形、扇形或其他形状波束的天线。由于具有低旁瓣、窄波束、高增益、质量轻、结构紧凑、制造方便等优点,透镜天线在近毫米波和亚毫米波波段具有独特优势。

本书作者约翰·桑顿曾在卢瑟福·阿普尔顿实验室工作,后任职于约克大学,并取得博士学位,此后加入 MDA 空间和机器人有限责任公司,负责英国天线方案设计。黄高成博士具有英国牛津大学博士学位,曾在英国格林尼治大学任职,并担任德国索尼技术中心的高级研究工程师,著有《毫米波技术》等两本著作,在毫米波通信领域拥有多项世界和国际专利。

本书来源于作者近年来的重点研究内容和心得体会,主要介绍了当代透镜天线的设计原则和分析方法,并通过实例详细分析其性能。

本书可以为专业人士提供一个透镜天线应用的设计思路,其适用于射频/微波/毫米波专业技术人员和工程设计人员,也同样适用于具有天线和电磁波专业基础的大学生以及现代通信相关领域的研究人员。

本书在翻译过程中力求忠实原文,语句通顺,简洁易懂。但由于水平有限,对书中有些术语难免把握不准,出现的疏漏和差错希望广大读者特别是天线设计领域的专家不吝赐教,多提宝贵意见。

电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室

2015.10 于洛阳

本书的目的是介绍当代透镜天线的设计原则和分析方法,给大学生和射频/微波专业人士提供一个透镜天线应用的设计思路。读者可能会问:为什么要编写这样一本关于透镜天线的书呢?因为此类书籍还未出版过,而且它的重要性一直被低估。此外,该书将带领大家一起了解作者的若干研究领域,在这些通信应用技术中,天线技术扮演着十分重要的角色。在这里我们将通过透镜天线的独特性能向大家展示其优越性。

透镜天线具有窄波束、高增益、低旁瓣和低噪声温度的优点,与喇叭天线和抛物面反射器天线相比,透镜天线的结构更加紧凑,质量更小。透镜天线具有准光学特性,损耗小,尤其是在近毫米波和亚毫米波波段时具有独特的优势。另外,透镜天线可通过控制穿过透镜孔径的相位分布的方式来实现波束整形,这种方法与反射方法相比更精确、成本更低,而且这样形状的介质透镜在小到中等规模生产方面实现起来比其他一些特殊应用天线类型更容易。此外,球面透镜天线没有扫描损耗和宽频带,可以从共同的孔径选择多个波束。

本书适用于射频/微波专业人员(工程师、设计师及开发人员)及微波和毫米波研究项目的工程技术人员,也同样适用于具有天线和电磁波专业基础的大学生阅读。专业基础涵盖电波传播、反射和透射、波导、传输链路以及其他一些天线的基本概念。这些课程通常通过设计项目来展现给大家,本书可作为设计项目的教材。现代通信相关领域的研究生和研究人員同样会对这本书产生兴趣,因为这本书收录了该领域最新的研究文献和专利。

基于以上原因,本书对透镜天线技术开展系统前沿研究,并不是想面面俱到地讲解透镜天线技术,相反,在下面的章节中,将着重介绍作者自己近年来的研究重点,并通过实例详细分析其性能。

各章节的摘要如下:

第1章概括介绍不同类型的透镜天线及其发展历史,主要讨论延迟透镜的基本原理(射径随透镜媒质的增多而增大),加速透镜的基本原理(射径随透镜媒质的减少而减小),透镜的材质和透镜天线的实际应用。本章广泛讨论了一些相当独特的天线类型,但这些天线还不能归类为“透镜”,如平面或频率选择性表面类型、介质透镜的非涅耳区变体类型。本章最后概述天线测量技术。

第2章重新回顾一下重要的波的传播与天线的参数,以便这些参数在上下

文使用中一致并方便引用。参数涵盖在不同的介质(如无损和有损电介质),从相同的平面波到所有重要的天线参数。

第3章重点介绍低成本高指向性的介质杆天线。详细讨论不同的馈电方式、最大增益和波束倾斜。多波束介质杆天线阵能够增大辐射覆盖面积,通过相位补偿来调整波束方向。

第4章将探讨有关毫米波的问题,如高路径损耗和高功率消耗。接着探讨多种毫米波透镜天线和新颖的设计方法,以及如何将透镜天线的准光学特性用于辅助设计毫米波和亚毫米波的波长。

第5章讨论用于高空平台通信的天线性能。据此,本章提出了一个研究案例,对该领域来说,透镜天线被确定为潜在解决方法。本章首先对采用多点波束频谱复用的蜂窝结构进行系统级分析,接着介绍具有赋形波束和低旁瓣的透镜天线如何直接抑制同道干扰,将一个实际的设计和结果呈现给读者。

第6章概括球面透镜天线的性能,包括龙伯透镜及其特性。本章讨论多种分析技术,分别对射线追踪和更强大的球面波扩展技术进行讨论,随后论述透镜结构问题,概括总结了球面透镜的恒定的折射率。

第7章内容承接第6章内容和几个来自半球反射面透镜天线研制方案的报告。在地基平台上,半球透镜天线与球面透镜具有相同的孔径,但天线高度只需球面透镜的一半,这个优点并不被大家熟知。最后介绍一种用于卫星通信的双波束透镜天线,它是一种连续指数反射透镜,特别适用于空-地链路。

John Thornton

Kao - Cheng Huang

致谢

本书由约翰·桑顿和黄高成两位作者共同完成。这份手书稿在撰写准备期间得到诸多同仁的热情帮助,作者对此深表感谢。首先,感谢书稿评阅者提出的宝贵建议。其次,感谢电气和电子工程师协会(IEEE)的版权许可。

感谢德雷克·格雷博士为撰写 7.7 节所付出的努力。

感谢为该书倾注大量心血的广大研究者,他们的付出是该书丰富的参考来源。此外,对支持该书编写的 IEEE 编辑表示真挚的感激。感谢曾田·泰介、玛丽·哈彻和约翰·威利父子公司的其他工作人员提供的无私帮助。

此外,黄高成博士感谢大卫·爱德华兹教授(英国牛津大学)、王朝诚教授(中国清华大学)、李建瀛教授(新加坡国立大学)、雷知春教授(德国鲁尔西区应用科学大学)、沈薛曼教授(美国纽约大学)、洪杰森教授(英国赫里奥特瓦特大学)和黄向荣女士(伊利诺斯研究所),感谢他们多年来的支持。黄博士还要感谢约翰·威利父子公司(第 5 章和第 6 章的毫米波天线的千兆无线通信,是 2008 年由黄博士和爱德华编写的《系统环境设计和分析实用指南》)、德国施普林格出版集团(《天线手册》卷 3 第 17 章“天线应用”于 1993 年由罗和李编写)和奥法尼德斯(《电磁波和天线》的 1.5 节和 2.12 节于 2010 年由奥法尼斯编写)的版权许可,使得这些内容可以用于第 2~4 章的摘录。

约翰·桑顿感谢约克大学的戴维·格雷斯博士(2003 年至 2006 年欧盟 FP6 CAPANINA(欧盟各国 14 个国际合作方的第 6 框架重大研究项目从空中平台通信网络提供宽带信息工程)项目经理)和提姆托泽先生(通信研究组组长),感谢他们对本书第 5 至第 7 章内容给予的帮助。

第 7 章介绍了 2007 年至 2009 年间由欧洲航天局资助的合同编号为 20836/07/NL/CB 的多个项目。感谢欧洲航天局项目经理马腾·范德沃斯特的大力支持。

感谢安迪·白和安迪·帕特森,他们是书稿完成的关键。感谢马克·霍夫的测量工作和后勤支持,以及格拉哈姆·郎的机械设计。感谢来自霍利克罗夫特合作的菲利普·海恩斯为我们提供产业视角。同样感谢 2009 年 8 月发表于

《微波学报》杂志的一篇文章,它为该书提供重要的参考资料。

约翰·桑顿博士还要感谢德雷克·格雷先生,他于2000年后期发表的有关透镜理论的合著为本书提供参考。感谢斯图尔特·格雷森先生(加利福尼亚托兰斯近场系统公司),感谢他们同意本书在第1章使用扫描图像和对作者的支持。

John Thornton

Kao - Cheng Huang

第1章 引言	1
1.1 透镜天线:概述	1
1.1.1 微波透镜	2
1.1.2 透镜天线的优点	4
1.1.3 透镜材料	4
1.1.4 合成透镜	5
1.2 透镜天线的馈源	6
1.2.1 微带馈源	6
1.2.2 喇叭馈源	7
1.3 龙伯透镜和球面透镜	8
1.4 准光学和透镜天线	10
1.5 透镜天线设计	14
1.6 超材料透镜	20
1.7 平面透镜或表面相移	23
1.7.1 反射阵列	23
1.7.2 平面透镜或透镜阵列	25
1.8 实际应用	28
1.9 天线测量	28
1.9.1 辐射方向图的测量	29
1.9.2 增益测量	29
1.9.3 极化测量	29
1.9.4 消声室和测量范围	29
参考文献	34
第2章 电磁波理论概述	38
2.1 麦克斯韦方程组	38
2.1.1 边界条件	41
2.1.2 等价定理	42

2.2	天线参数	43
2.2.1	波束立体角和天线温度	43
2.2.2	方向性和增益	44
2.2.3	天线的波束宽度	46
2.2.4	天线的孔径	48
2.2.5	相位中心	49
2.3	天线极化	49
2.4	超材料中的传播特性	55
	参考文献	58
第3章	介质杆天线	60
3.1	介质杆共振器	60
3.2	介质杆作为辐射体	65
3.3	插接反馈循环介质杆	70
3.4	介质杆天线阵	75
3.5	多波束介质杆天线阵	81
	参考文献	85
第4章	毫米波透镜天线	89
4.1	毫米波特性	89
4.1.1	毫米波损耗因子	90
4.1.2	射线追踪法	92
4.2	用于成像的毫米波衬底透镜	95
4.3	毫米波与亚毫米波透镜	99
4.3.1	延伸式半球透镜	101
4.3.2	旁轴延伸式半球透镜	105
4.3.3	亚毫米波通信透镜天线	107
4.4	毫米波球面透镜分析	109
4.5	波导馈源毫米波综合透镜	111
	参考文献	112
第5章	高海拔平台通信透镜天线	116
5.1	概述	116
5.2	高空平台概念	116
5.2.1	高空平台频谱复用	118

5.2.2	模型数据:单元功率和干扰	122
5.3	反射镜天线的优点	125
5.3.1	反射器	126
5.3.2	透镜	127
5.3.3	商业透镜天线	128
5.4	非对称成形波束低副瓣透镜天线的发展	129
5.4.1	主馈源	130
5.4.2	波束宽度 5° 的对称天线	132
5.4.3	不对称波束	133
5.4.4	测量	138
5.5	透镜天线有效载荷模型	139
5.6	多馈源天线	140
5.7	高空平台复合电波球形透镜天线	142
	参考文献	145
第6章	球面透镜天线	148
6.1	引言	148
6.2	球面透镜概览	151
6.3	分析方法	154
6.3.1	射线追踪	154
6.3.2	球面波展开技术	155
6.3.3	计算方法和结果	159
6.3.4	通用馈源模式	162
6.3.5	商业求解器	163
6.4	球面透镜材料和制造方法	165
6.4.1	机械加工聚合物	165
6.4.2	成型	166
6.4.3	聚合物泡沫	167
6.4.4	聚氨酯介质损耗	168
6.4.5	人工电介质	169
6.5	恒定折射率透镜	169
6.5.1	实用型恒定折射率的半球形透镜贴片馈源	172
6.5.2	离轴馈源阵列球面透镜	173
6.6	球面透镜交叉极化特性	173
	参考文献	174

第 7 章 半球透镜反射扫描天线	177
7.1 引言	177
7.2 扫描天线技术	177
7.3 球形和半球形透镜天线	179
7.4 半球透镜原型	180
7.5 两层阶梯型聚合物透镜演化	182
7.6 用于卫星通信的半球透镜反射器天线	187
7.6.1 要求	188
7.6.2 透镜分析	188
7.6.3 三层透镜几何图形	189
7.6.4 透镜制备及性能	191
7.6.5 机械跟踪系统	192
7.6.6 地平面的影响	194
7.6.7 扫描透镜反射器的孔径堵塞	196
7.7 低折射率透镜反射器航空器通信(D·格雷著)	197
参考文献	207

第 1 章 引言

在微波天线的早期发展过程中,透镜天线技术已经被广泛研究,它受到现有大量光学著作的影响。随后,随着透镜天线被高效的、大孔径反射天线、赋形波束天线阵列,多波束天线阵列和扫描天线阵列所取代,人们对透镜天线的研究兴趣有所下降。最近,随着人们对毫米波和亚毫米波频段研究兴趣的不断升高,透镜天线再次受到了开发者的青睐。

本章分 9 个部分分别介绍透镜天线的基础知识。1.1 节简单介绍透镜天线,归纳透镜的优点、缺点和构成材料;1.2 节讨论天线的馈源;1.3 节介绍龙伯透镜的原理(第 6 章和第 7 章主要研究内容);1.4 节介绍准光学透镜;1.5 节介绍透镜天线的设计规则;1.6 节讨论透镜天线的金属材料;1.7 节介绍与反射阵列天线相对的平面透镜阵列天线;1.8 节给出透镜的实际应用;最后一节(1.9 节)将讨论测量技术和消声室技术。

1.1 透镜天线:概述

微波应用中,介质透镜的使用大概可以追溯到早期的 60 GHz 电磁波光学特性相关的验证试验^[1]。然而直到第二次世界大战,透镜技术应用到天线中才受到重视。但因为其尺寸大,工作频率低,这种技术并没有被广泛使用。

近年来,人们重新审视介质透镜,不仅是因为快速增长的毫米波应用,透镜的结构尺寸合理,此外,低损耗的介电材料很容易获得,现在大量数控机器的使用大大降低了制造具有良好容差的精良透镜的成本。

在最早的介质透镜天线的应用中,均匀透镜旨在产生一个广角的扫描波瓣^[2]。同时,均匀透镜被用作喇叭天线的相位前端校正。透镜通常安装固定在空心金属喇叭顶部^[3]。在这个设置中,透镜的前后表面能够用于设计同步条件。此外,透镜可以用来进一步控制锥形透镜孔径的场分布的斜度^[4]或在特殊应用中对输出波束幅度进行赋形^[5]。

固体电介质喇叭天线的孔径可以做成特殊形状的透镜,从而来修改或改善一些辐射特性^[6]。比如,通过校正孔径相位误差来改善固体电介质喇叭天线孔径效率(开口比)。另外,可以使用透镜来对输出光束的振幅进行赋形或改善交

叉极化性能,但是因为只有一个透镜表面是变化的,所以这些可能只有一个是最
佳的设计目标。

1. 1. 1 微波透镜

光学中,镜子反射光线,而透镜折射光线。凹面镜导致光线反射并产生焦
点。相比之下,透镜工作原理恰恰相反:凸透镜通过光线的折射聚集光线,产生
焦点。当光照射到一个凸透镜,由于光线折射朝向一条直线并贯穿中心的透镜
(如光轴),从而导致了聚焦。除了这种差异,凸透镜天线与凹面反射器天线具
有类似的工作方式,波阵面(或相位面)之间的所有射线通过同一个透镜具有相
同的光学路径长度。菲涅耳方程是基于具有附加极化效应的菲涅耳折射定律,
可以应用于透镜表面。

一般来说,透镜可以使入射的发散能量成为平行光束,从而阻止其向传播方
向扩散。另外,透镜要使球形或圆柱形波阵面光束平行,可以分别通过一个点或
线源射向平面或线性波阵面。然而实际中,复杂馈源或多重性馈源是可以容忍
的,因为随着微小的轴外馈射位移,性能不会迅速恶化。

这里有两个主要设计概念用于实现不同的目标。

(1) 常规型(如双曲线、双-双曲线、半球形或椭圆形)或赋形透镜天线仅
仅用于对准来自馈射源辐射的能量。

(2) 选择更加复杂的表面是为光束赋形,从而产生需要的辐射模式,或产生
携带单个或多个馈源圆柱和球面,并用于光束扫描。

透镜内还可以放入一个同类的或其他类别的延迟和加速透镜(图 1. 1)。条
件与透镜介质中的相速度有关。延迟透镜类型如图 1. 1 (a) 所示,透镜介质使电
气路径的长度增加,因此,传播增加了延迟。

最常见的类型是介质透镜,但另一种是 H 面金属板透镜,如图 1. 2 所示。 H
面包含磁场矢量,即最大辐射方向,或主瓣瞄准线。磁场(或 H 面)与电场(或 E

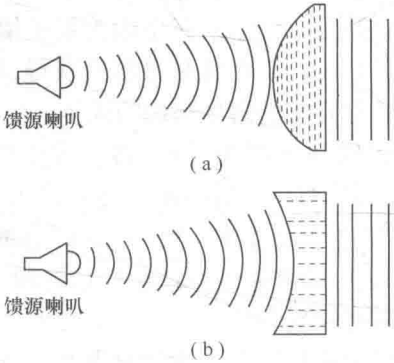


图 1. 1 (a) 为延迟透镜或介质透镜,(b) 为 E 面金属板(加速)透镜,
对比(a)和(b):(a)中波前被延迟;(b)中波前被提前

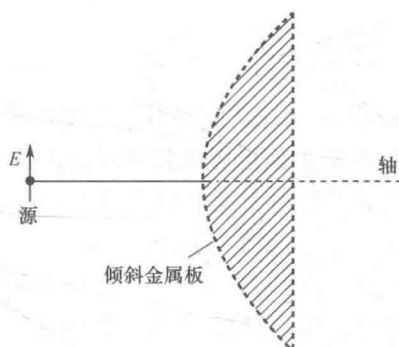


图 1.2 H 面金属板透镜天线

面)成直角。

图 1.1(b)解释了加速透镜类型中如何通过透镜介质有效地缩短电气的波程长度。加速透镜的代表类型之一是 E 面金属板透镜(E 面包括电场矢量,即最大辐射方向。 E 面和 H 面正交,并决定无线电波的极化方向)。

就透镜材料而言,介质透镜可以分为两种不同的类型。

(1) 由传统介质构成的透镜,如有机玻璃或聚苯乙烯等。

(2) 由人造介质构成的透镜,如在透镜中加入陶瓷的或金属的粒子。

透镜天线通常是定向天线,而不是全向天线。透镜天线在某一个方向上具有一个单一的、独特的辐射波瓣。在这种情况下,透镜天线被当作端射辐射器。鉴于此,介质杆天线就是一个很好的例子,如图 1.3 所示,因为介质杆通常是由聚苯乙烯制成,所以它被称为介质。

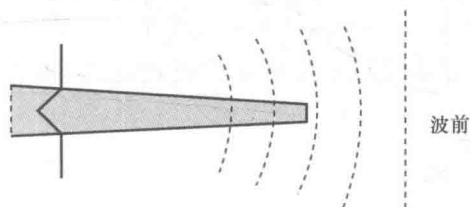


图 1.3 基本的透镜天线形式:介质杆天线

介质对电磁波来说并不是没有缺点,首先它的波导性差,因为能量不断从介质杆的表面辐射出去。这种辐射趋势是渐弱的,可以通过制定杆的尺寸和形状来控制辐射特性,这将在第 3 章详细讨论。

与介质杆天线相比,大多数透镜的尺寸要大于波长,设计也是基于准光学计算。随着波传播长度趋于零,透镜表面的最大限值由斯涅尔折射定律和波程长度条件(或能量守恒条件)决定。透镜形状决定了衍射,衍射导致最终样式产生不一致性。但是这些评论都真正关心的是轴对称透镜。另外,关于任意形状介质透镜和三维振幅赋形介质透镜等方面的参考文献也可以查询的到^[5]。

1.1.2 透镜天线的优点

透镜是一种高效的天线解决方案,它可以同时实现波束成形、旁瓣抑制和波束敏捷性(或空间转向)。介质透镜也可能带来经济效益,因为它们可以通过制模制造或通过自动化机器加工实现大规模量产,而且这些生产流程都允许有一定的误差。当通过一个孔径时,透镜用于实现球面波阵面向平面波阵面的转换,从而像抛物面反射一样可提高其方向性。基于这个目的,把馈源放置在透镜后面的透镜比反射镜更有优势,这样通过馈源和支柱消除孔径堵塞,而不必调整位移偏差。透镜天线这种以高度对称的方式照射第二级孔径而没有孔径堵塞的能力会带来很多好处,如较低的失真和交叉极化。

当然,微波透镜也有缺点,比如介电损耗和反射失配。但是,微波透镜可以使用低损耗材料来降低损耗,如聚四氟乙烯、聚乙烯、石英等损耗可以忽略不计。反射失配的解决方法主要包括使用四分之一波长的反反射层或涂层(如果该反射层很薄)。这里举几个例子,硅透镜使用添加了氧化铝的环氧材料作为反反射层,取得不错的效果^[7]。但是,环氧材料在 1 THz 以上频率时,吸收损耗较大^[8]。恩勒特等^[9]已成功实现了在硅窗的两面覆盖厚度只有 20 μm 的低密度聚乙烯涂层,以成功实现波长 $\lambda = 118 \mu\text{m}$ 的反反射性能。其他普通塑料材料如聚酯薄膜和聚酰亚胺薄膜也是很好的透镜材料,因为这些材料的折射指数非常接近理想值 $n_{\text{硅}}^{0.5} \sim 1.85^{[10]}$;但是,此类材料并不应用到小型硅透镜。聚对二甲苯薄膜可以用作硅质光学透镜的反反射层,它在 1 THz 以上频率具有良好的低损耗性^[10]。相反,在较低频率范围,如 10 ~ 60 GHz 范围内,可以在透镜表面添加空气槽,这样就产生一个高效的中间折射率的空气介质复合层,这种制造工艺在透镜天线的商业使用中受到了广泛欢迎,它降低了随频率不同导致的增益变化。

1.1.3 透镜材料

导体本身和介质决定天线的有效寿命,导体是一种含有大量自由传导电子或具有超强传感性的材料。天线中典型的传导材料有:

- (1) 银(传导率: $6.14 \times 10^7 / \Omega \cdot \text{m}$);
- (2) 铜(传导率: $5.8 \times 10^7 / \Omega \cdot \text{m}$);
- (3) 铝(传导率: $3.54 \times 10^7 / \Omega \cdot \text{m}$)。

介质实质上是绝缘体,它本身具有很少的自由传导电粒子,传导率很小。

通常情况下可认为优良导体的传导率为无穷大,介质的传导率值为零。制作一个透镜天线,很有必要选择一种机械和电磁性都稳定的材料。典型的材料的介电常数范围为 1.2 ~ 13。实际上这些材料现阶段都在使用,而且将会在毫米波天线系统中广泛使用。因为受时间和空间条件的限制,并不能将当今所有