

共面波导 馈电平面天线

PLANAR ANTENNA FED BY COPLANAR WAVEGUIDE

张厚 著◆



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

共面波导馈电平面天线

张厚 著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

全书主要讨论共面波导馈电的平面天线。书中首先阐述了共面波导结构的特点、共面波导馈电平面天线的种类及其发展现状；接着对渐变开槽天线、多模天线、单极子天线、圆极化天线等几种典型的共面波导馈电的天线进行了论述；最后介绍了一种新结构 UC-PBG 在共面波导中的应用以及 FDTD 计算方法在共面波导中的应用。本书内容不仅涉及了当前本学科的热点问题，而且也介绍了共面波导结构的新应用。

本书可供微波技术与天线工程技术人员使用，也可以作为高等院校电子类专业高年级本科生和研究生的教材和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

共面波导馈电平面天线/张厚著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2014. 3

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3268 - 1

I. ① 共… II. ① 张… III. ① 共面波导—天线馈电—平板天线 IV. ① TN821

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 018213 号

策划编辑 云立实

责任编辑 云立实 张俊利

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×960 毫米 1/16 印张 11

字 数 194 千字

印 数 1~2000 册

定 价 25.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3268 - 1/TN

XDUP 3560001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

前 言

近年来,由于微带线结构在天线中的应用日趋完善,人们把更多的注意力转移到了共面波导结构,以寻求天线的新进展,其中关于共面波导馈电超宽带天线的研究成为当前学术界的一个热点,相关的文献也是层出不穷。共面波导作为一种平面传输线结构,不仅具有微带线结构的低剖面、低成本和易共形等优点,还具有自身低色散性、易集成和低传输损耗等优势。本书以共面波导结构作为论述的纽带,主要涉及到共面波导馈电的渐变开槽天线、多模天线、单极子天线、圆极化天线以及新结构 UC-PBG 和 FDTD 计算方法在共面波导中的应用等,全书内容不仅涉及当前学科的热点问题,而且也介绍了共面波导结构的新应用。

全书共分为 7 章。第 1 章为概述,阐述了共面波导结构的特点、共面波导馈电平面天线的种类及其现状;第 2 章介绍了共面波导馈电渐变开槽天线,给出了天线的结构、分析、仿真结果与测试结果;第 3 章为共面波导馈电的双模天线,在介绍共面波导传输模式及空气桥电路分析的基础上,设计了一种双模天线;第 4 章论述了共面波导馈电的单极子天线,首先介绍了平面单极子超宽带天线及其设计原理,其次对其进行结构设计,最后对其时域和频域特性进行了分析讨论;第 5 章对共面波导馈电圆极化天线进行了论述,从圆极化天线产生的机理出发,首先介绍了平面天线实现圆极化的方法,其次论述了一种共面波导馈电的圆极化缝隙天线,最后研究了 I. Jen Chen 提出的圆极化天线阵,并结合顺序旋转馈电技术,分析了一种改进的天线;第 6 章论述了 PBG 结构在共面波导结构中的应用,首先对背面金属支持共面波导结构做了简单分析,在此基础上,引出了一种新结构 PB-CPW,接着分析了共面形光子晶体结构的特性,最后,给出了新结构 PB-CPW 的几种应用;第 7 章为 FDTD 方法在共面波导结构中的应

用,首先对麦克斯韦方程及其 FDTD 形式、数值稳定性条件、吸收边界的设置、共面波导端口激励设置、局部共形 FDTD、近远场外推技术等几个关键技术加以论述,在此基础上,给出了共面波导馈电双频天线的 FDTD 分析。

本书是作者近几年所做工作的归纳和总结,研究生王剑、徐海洋和杨自牧对书中的算例进行了仿真和分析并协助撰写了部分内容,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

2013 年 12 月

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 共面波导结构特点	(1)
1.2 共面波导变形结构	(3)
1.3 共面波导馈电平面天线的种类及其现状	(4)
1.3.1 共面波导馈电宽带天线	(4)
1.3.2 共面波导馈电圆极化天线	(10)
1.3.3 共面波导馈电多模天线	(13)
第 2 章 共面波导馈电渐变开槽天线	(14)
2.1 引言	(14)
2.2 槽线的基本特性	(14)
2.3 共面波导至槽线的转接器	(16)
2.3.1 共面波导的基本特性	(16)
2.3.2 共面波导至槽线转接器的形态	(17)
2.3.3 非均衡共面波导至槽线的宽频转接器	(23)
2.3.4 非均衡宽频转接器的设计	(24)
2.3.5 宽频转接器的测量结果	(29)
2.4 渐变开槽天线的设计准则	(31)
2.5 渐变开槽天线	(33)
2.5.1 天线结构	(34)
2.5.2 天线的特性分析	(35)
2.5.3 天线的栅栏优化分析	(38)
2.5.4 仿真与测试结果	(40)
2.6 本章小结	(44)

第 3 章 共面波导馈电的双模天线	(45)
3.1 引言	(45)
3.2 共面波导的传输模式	(45)
3.3 空气桥电路的分析	(47)
3.4 双模天线的设计	(50)
3.4.1 辐射部分	(50)
3.4.2 馈源部分	(52)
3.4.3 双模天线的整体结构	(55)
3.4.4 应用前景	(59)
3.5 本章小结	(60)
第 4 章 共面波导馈电的单极子天线	(61)
4.1 引言	(61)
4.2 平面单极子超宽带天线	(61)
4.2.1 平面单极子超宽带天线概述	(61)
4.2.2 平面单极子天线的设计原理	(62)
4.3 天线结构	(63)
4.4 结果与讨论	(66)
4.4.1 频域特性	(66)
4.4.2 时域特性	(70)
4.5 本章小结	(73)
第 5 章 共面波导馈电的圆极化天线	(74)
5.1 引言	(74)
5.2 平面天线圆极化实现方法	(74)
5.3 圆极化缝隙天线设计的基本思想	(75)
5.4 天线结构	(79)
5.5 天线结构参数的仿真分析	(80)
5.5.1 圆形缝隙半径大小对天线性能的影响	(80)
5.5.2 矩形枝节位置 L_1 对天线性能的影响	(81)
5.5.3 杯形枝节对天线性能的影响	(82)
5.6 天线性能分析	(83)

5.7	圆极化缝隙天线的制作与测试	(86)
5.8	CPW 馈电圆极化天线的研究	(89)
5.8.1	I. Jen Chen 提出的圆极化天线	(89)
5.8.2	共面波导-槽线的 T 型电路模型	(90)
5.8.3	共面波导-槽线的 T 型电路的优点	(91)
5.9	顺序旋转馈电技术	(94)
5.9.1	顺序旋转馈电技术的定义	(94)
5.9.2	顺序旋转馈电技术的特点	(94)
5.9.3	顺序旋转馈电技术的理论证明	(95)
5.10	采用顺序旋转馈电的 I. Jen Chen 天线	(98)
5.10.1	天线结构	(98)
5.10.2	结果与讨论	(100)
5.11	本章小结	(103)
第 6 章	PBG 结构在共面波导中的应用	(104)
6.1	引言	(104)
6.2	背面金属支撑共面波导结构	(104)
6.2.1	CB-CPW 传输线	(104)
6.2.2	CB-CPW 的传输特性	(105)
6.2.3	CB-CPW 特性阻抗分析	(111)
6.2.4	抑制平行板模式的方法	(112)
6.3	共面形光子晶体结构的特性研究	(116)
6.3.1	共面紧凑型光子晶体	(116)
6.3.2	确定 UC-PBG 带隙的等效电路模型	(117)
6.3.3	确定 UC-PBG 带隙的数值计算方法	(120)
6.4	PB-CPW 传输结构在天线中的应用	(126)
6.4.1	PB-CPW 结构的提出	(126)
6.4.2	PB-CPW 的传输特性	(127)
6.4.3	PB-CPW 应用实例 1	(131)
6.4.4	PB-CPW 应用实例 2	(134)
6.4.5	PB-CPW 应用实例 3	(138)

6.5 本章小结	(140)
第7章 FDTD 在共面波导中的应用	(142)
7.1 引言	(142)
7.2 运用 FDTD 计算共面波导的关键技术	(142)
7.2.1 麦克斯韦方程及其 FDTD 形式	(142)
7.2.2 数值稳定性条件	(144)
7.2.3 吸收边界的设置	(144)
7.2.4 共面波导端口激励设置	(145)
7.2.5 局部共形 FDTD	(148)
7.2.6 近远场外推技术	(150)
7.3 共面波导馈电双频天线的 FDTD 分析	(150)
7.3.1 共面波导馈电双频天线	(150)
7.3.2 FDTD 计算模型	(151)
7.3.3 FDTD 计算结果	(152)
7.4 本章小结	(154)
参考文献	(155)

第 1 章 概 述

随着航空和航天技术的发展,对微波天线和整个系统要求做到小型、轻量化和性能可靠。首当其冲的问题是要有新的导波系统,而且该系统应为平面型结构,以便使微波电路和系统能够集成化^[1]。在这种迫切的要求下,微带传输线结构应运而生,并以其低剖面、低成本和易共形等诸多优点而逐渐得到了广泛的重视。从 1970 年出现第一批实用的微带天线^[2-3]之后,微带天线的研究就有了迅猛的发展,新型式和新性能的微带天线不断涌现,在国内外,大量的有关学术论文和研究报告不断发表,并召开了专题会议以及出版了很多专集^[4]。

在微带传输线蓬勃发展的同时,其他型式的平面传输线也陆续被提出,主要包括鳍线、槽线、悬置微带、共面波导线和共面带状线等。由于以上平面传输线的提出正是微带线研究如火如荼的时候,因此,相应的研究比较少,相应的理论也没有微带线那么完善。但是,由于其独特的优点,共面波导在近几年受到了愈来愈多的重视。

1.1 共面波导结构特点

共面波导(简称为 CPW)结构是 1969 年由 C. P. Wen 教授首先提出的一种集成传输线^[5],它是由介质基片上的中心导带和中心导带同一侧的两个接地导电平面构成的,其结构如图 1.1-1 所示,其主模仍然是准 TEM 波。由图可知,CPW 具有与有源器件、无源器件连接十分方便的优点,不需要在介质基片上打孔。CPW 具有椭圆极化磁场,因此也可以制成非互易铁氧体器件。由于 CPW 与传统微带线相比有着诸多方面的优点,所以它受到了学术界的重视。Wen 采用准 TEM 的近似方法研究了这种对称结构的 CPW,并设计了 CPW 定向耦合器^[6]。但是,Wen 的分析是在假定介质基片厚度为无限大的情况下进行的。1973 年,M. E. Davis 等学者按照介质基片为有限厚度,采用保角变换理论分析了 CPW 的特性,使所得结果更加准确^[7]。



图 1.1-1 CPW 结构示意图

后来许多学者对这种 CPW 进行了研究。J. B. Knorr 对 CPW 进行了全波分析,并讨论了特性阻抗的计算方法^[8]; Gopinath 计算了对称 CPW 的损耗,计算结果表明,在特性阻抗的很大范围内,CPW 的损耗都远小于微带线^[9];法国学者 C. Veyres 等采用保角变换技术分析了有限宽度的 CPW^[10]。随着对 CPW 研究理论的发展,由 CPW 构成的天线也得到了重视,特别是在 1990 年以后,有关 CPW 的学术论文数量也逐年增加。

CPW 有以下优点:首先,CPW 的地与信号线位于介质板的同一层,容易实现与其他微波器件的串联或者并联连接,而不必在基片上钻孔,进而可以实现电路的小型化和信号的完整性;同时,寄生参量小;很容易提高集成电路密度。其次,CPW 传输线的色散特性也优于微带线,适于在电路和天线宽带化中的应用;而且,CPW 的辐射损耗也相对较小,可以提高天线的极化纯度和工作效率。最后,CPW 可以传输奇模式与偶模式,增加了天线设计的灵活性。

CPW 的色散特性优于微带线,说明共面波导传输线更适合于微波器件的宽频化。通过选取不同的天线结构,当采用 CPW 馈电时可以拥有更加优越的特性。阮成礼教授和 R. Chair 教授分别在文献[11]和文献[12]中比较了共面波导馈电超宽带天线与微带线馈电超宽带天线的特性。其中,文献[11]说明,对于图 1.1-2 所示的天线结构,相对于微带线馈电,采用共面波导馈电可以具有更宽的工作频带(大于 158%),而且,其辐射的远场方向图具有更好的对称性。文献[12]说明,对于同样的矩形缝隙天线(如图 1.1-3 所示),采用共面波导馈电的天线可以达到 120%带宽,而采用微带线馈电的天线为 110%带宽,共面波导馈电具有更宽的频带特性。从以上的结论可以看出,共面波导在天线设计中有着广阔的应用前景。

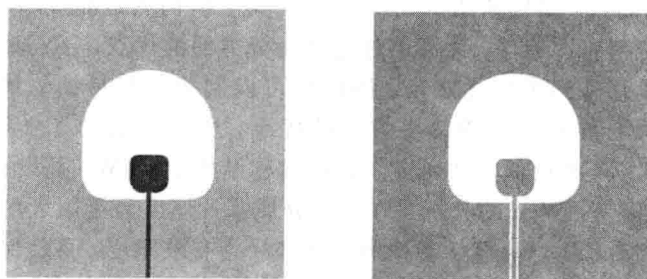


图 1.1-2 文献[11]中比较的两个天线

在实际应用中,对于共面波导的研究具有很重要的意义,主要体现在以下几个方面:① 共面波导馈电的超宽带天线以其宽频带、易加工和仅需要单一金属层等优点而得到重视;② 共面波导可以传输奇模式和偶模式,对于新型天线

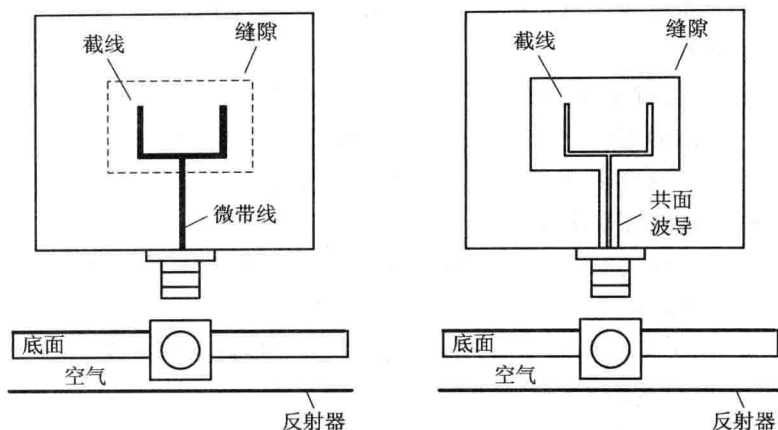


图 1.1-3 文献[12]中比较的两个天线

的研究也成为现实；③ 随着新结构与新概念提出，例如光子晶体和左/右手介质，均促进了新型 CPW 结构的发展；④ 随着共面波导在工程中的广泛应用，采用时域有限差分法计算 CPW 电路成为分析天线特性的一个主要方法，特别是对天线时域特性的分析。相对于微带线来说，共面波导结构仍处在发展阶段，还有许多特性和应用有待于研究人员去探索。

1.2 共面波导变形结构

随着 MMIC(单片微波集成电路)的迅速发展，使 CPW 的应用有了较广阔的前景，从而激发了国内外学者研究 CPW 的兴趣。随着研究的深入，许多学者又提出并分析了以下几种变形结构的 CPW。

1981 年法国学者 V. Fouad Hanna 首先提出了 ACPW 的概念并研究了介质基片为有限厚度和无限厚度的两种 ACPW^{[13][14]}。

1981 年 S. Seki 等人提出了低损耗慢波 CPW 概念^[15]。

由于 Wen 提出的 CPW 的三个导体均在介质基片的同一侧，所以为微波电路中有源器件的安装提供了极大的方便。然而，这种 CPW 不易消除有源器件散发的热量。为了解决这一问题，1982 年 Shih 和 Itoh 博士提出了在介质基片背后增加金属接地板支撑的方法^[16]，它不但提高了电路的功率容量而且增加了电路的机械强度。

1989 年 Alessandri 提出了悬置 CPW^[17]；上海交通大学周希朗教授采用近似的保角变换方法对全屏蔽 CPW 进行了准静态分析^[18]。

1994 年日本学者提出并研究了两个侧边屏蔽的 CPW^[19]，对有效介电常数进行了计算和测量。

1999 年大连海事大学房少军教授采用保角变换方法对带金属底板的 ACPW 进行了准静态的分析与研究^[20]，并给出了场结构图。

2005 年西班牙学者 L. J. Rogal 等人首先研究了由左手介质构成的 CPW，并给出了该传输线的等效电路^[21]。

2007 年，S. Seo 等人引入了 Inkjet Printing 技术来加工 CPW 电路和设计应用于 RFID 领域的天线^[22]。

随着新型 CPW 结构的提出，各种高性能的天线也相继被提出^[23-28]，同时，关于新型 CPW 结构的理论也逐步得到了完善。

图 1.2-1 为几种改进的 CPW 结构横截面示意图。

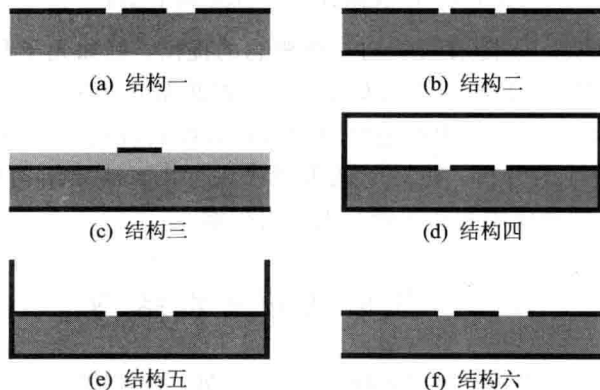


图 1.2-1 共面波导的多种变形结构

1.3 共面波导馈电平面天线的种类及其现状

根据 CPW 结构的特点，其馈电的平面天线主要包括宽带天线、圆极化天线、多模天线等，其中 CPW 馈电的宽带天线又分为单极子天线、缝隙天线等，宽带天线是应用较多的一种天线。

1.3.1 共面波导馈电宽带天线

超宽带天线是电子信息战中电子对抗设计的关键部件，在冲激雷达等时域系统中获得了广泛应用。随着高速电子集成电路的快速发展，为适应小型集成化的需求，超宽带平面天线的研究与应用引人瞩目。1990 年，R. N. Simons 等

人设计了 CPW 馈电的相控阵天线^[29]；1991 年, Menzel. W 等人设计了 CPW 馈电的微带贴片天线^[30]；A. Nestic 加工了 CPW 馈电的端射槽线天线。针对平面天线窄频带的不足, 可以展宽频带的各式各样的天线也逐渐被提出^[31]。特别是 2002 年, 美国联邦通信委员会(FCC)规定^[32], 超宽带室内通信与手持设备的实际使用频谱范围为 3.1 GHz~10.6 GHz。自从 FCC 规定了超宽带通信的频谱使用范围后, 共面波导馈电的超宽带天线研究也得到了长足的发展。2003 年, 台湾学者 H. D. Chen 等人使用具有加宽调节枝节的 CPW 馈线来激励一个方形缝隙天线, 实现了 60% 的阻抗带宽, 其带宽是传统 CPW 馈电方形缝隙天线的 1.9 倍^[33]；台湾学者 J. Y. Chiou 提出并在实验中测量了一种新型 CPW 馈电的金属条带加载的方形缝隙天线, 其工作频带可以超过 60%^[34]。图 1.3-1 给出 2003 年在部分文献中提出的 CPW 馈电的宽带天线结构。

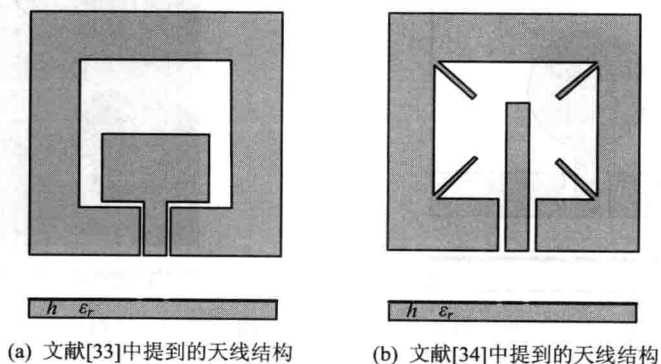


图 1.3-1 2003 年在部分文献中提出的天线结构

2004 年, Chair R. 等人设计了 CPW 馈电的矩形缝隙超宽带天线^[35]；Y. Kim 等人提出了具有带陷功能的超宽带天线^[36]；S. Y. Suh 等人研究了 CPW 馈电的圆盘形天线^[37]；Do Haon Kwon 等人设计了 CPW 馈电的具有六边形辐射单元的超宽带天线^[38] (如图 1.3-2 所示), 该天线工作于 3.1 GHz~10.6 GHz 频段, 大小仅为 22 mm×31.3 mm；上海大学钟顺时教授等人提出了 CPW 馈电的箭形宽带单极子天线^[39] (其工作带宽达到 111.8%) 和 CPW 馈电的线性渐变宽带缝隙天线^[40] (其工作带宽达到 40%, 且具有低的交叉极化特性)。

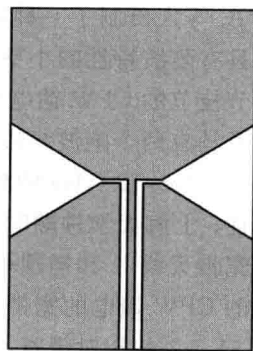


图 1.3-2 文献[38]提出的天线结构

2005 年, Kim Y. 等人^[41] 和 Saou Wen Su 等

人^[42]设计了具有陷波特性的 CPW 馈电的超宽带天线；英国伦敦大学 L. Guo 与学生研究了图 1.3-3 所示的 CPW 馈电的圆盘型单极子超宽带天线的频域和时域特性^[43-45]，并分析了天线工作带宽与天线几何参数之间的关系，总结了影响天线特性的主要因素；H. D. Chen 等人设计了 CPW 馈电的套筒形超宽带天线^[46]；D. C. Chang 等人设计了用于超宽领域的 CPW 馈电的“U”型单极子天线^[47]；X. N. Qiu 等人设计了 CPW 馈电的对称变形超宽带天线^[48]，该天线结构如图 1.3-4 所示；上海大学的钟顺时教授研究了紧缩形渐变 CPW 馈电的超宽带天线^[49]和宽带 CPW 馈电“△”型单极子天线^[50]；华东电子工程研究所的汪伟研究了宽带印刷天线与双极化微带及波导缝隙天线阵^[51]。

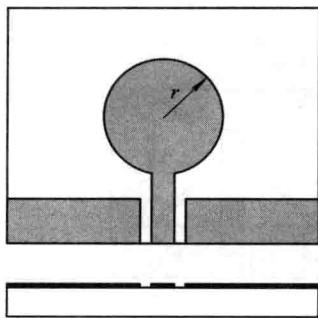


图 1.3-3 文献[43-45]中提到的天线

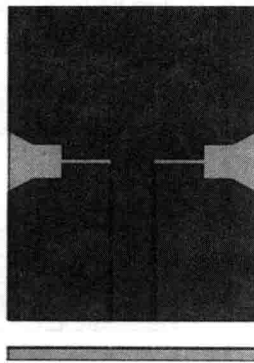


图 1.3-4 文献[48]中提到的天线

2006 年，Ma T. G. 等人设计了 CPW 馈电的超宽带渐变环缝天线^[52]；X. D. Chen 等人分析了椭圆形或圆形缝天线在超宽带天线中的应用^[53]；Denidni. T. A. 等人研制了一种新型的 CPW 馈电宽带缝隙天线^[54]；Lin Y. C. 等人设计了具有陷波特性的超宽带矩形孔天线^[55]；M. A. Saed 等人分析了具有不同调节枝节的 CPW 馈电的宽带平面缝隙天线的特性^[56]；Chien Ming Lee 等人设计了具有两个陷波频段的超宽带印刷圆盘单极子天线^[57]，该天线可以工作在 2.6 GHz~12 GHz 的频段，并且在 5.15 GHz 和 5.75 GHz 处存在明显的阻带特性；上海大学钟顺时教授和学生梁仙灵等人又提出了 CPW 馈电的渐变单极子宽带天线^[58]和椭圆平面宽带天线^[59]；电子科技大学阮成礼教授提出一种新型的 CPW 馈电的宽带天线^[60]，通过引入环缝和倒圆角等技术，使该天线达到了 81.5% 的相对带宽，可以覆盖大部分的 C 波段和整个 X 波段，同时，还研究和对比了微带馈电和 CPW 馈电超宽带天线的特性^[11]；西安电子科技大学焦永昌教授等人设计了用于 MIMO 系统的小型 CPW 馈电的“T”型天线^[61]。图 1.3-5~图 1.3-10 给出了部分天线的结构图。

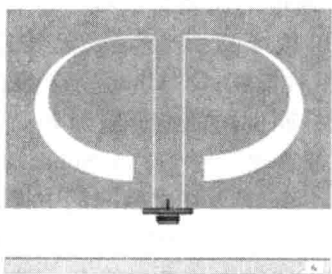


图 1.3-5 文献[52]提出的 UWB 天线

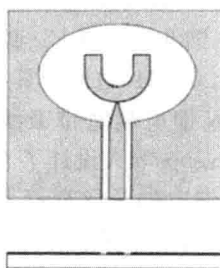


图 1.3-6 文献[53]提出的 UWB 天线

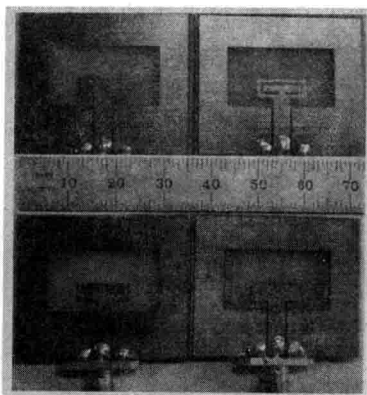


图 1.3-7 文献[55]提出的 UWB 天线

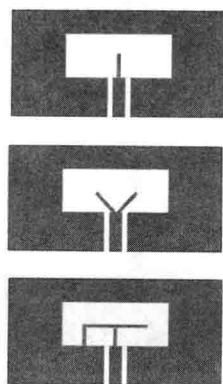


图 1.3-8 文献[56]提出的 UWB 天线

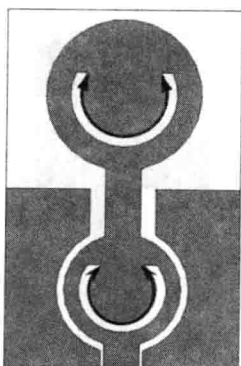


图 1.3-9 文献[57]提出的 UWB 天线

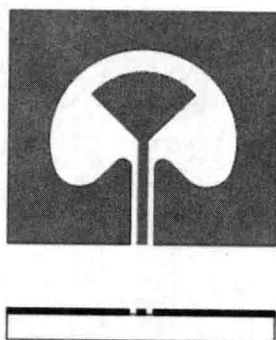


图 1.3-10 文献[60]提出的 UWB 天线

2007年, H. K. Kan 研究了紧缩形 CPW 馈电的超宽带天线^[62]; J. I. Kim 设计了 CPW 馈电的“LI”型平面超宽带单极子天线^[63], 该天线工作在 3.0 GHz~11.0 GHz 之间, 具有 114.3% 的相对带宽; X. Chen 等人提出了一种新型的 CPW 馈电超宽带天线, 天线部分包括圆倒角的矩形缝隙和局部的贴片^[64]; K. Nithisopa 等人设计了 CPW 馈电的宽带缝隙天线^[65]; A. Sundaram 等人设计了 CPW 馈电的分形宽带天线^[66]; M. Taguchi 等人在文献^[67]中提出了平面套筒超宽带天线; 张福顺教授等人研究了 CPW 馈电的“T”型缝隙宽带天线^[68]; 钟顺时教授设计了阻抗带宽超过 21:1 的印刷单极天线^[69], 该天线获得了 21.6:1 的带宽 ($VSWR \leq 2$), 覆盖频率为 0.41 GHz~8.86 GHz, 并具有良好的全向辐射特性, 而其面积仅为 $0.19\lambda_l \times 0.16\lambda_l$ (λ_l 为最低工作频率时的波长)。同时, 钟顺时教授还在文献^[70]中总结了超宽带天线的发展状况和天线的带宽特性。图 1.3-11~图 1.3-16 给出了部分天线的结构。

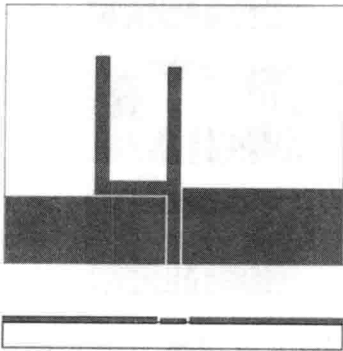


图 1.3-11 文献^[63]提出的 UWB 天线

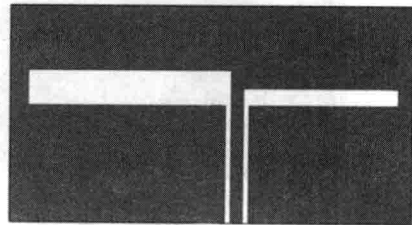


图 1.3-12 文献^[65]提出的 UWB 天线

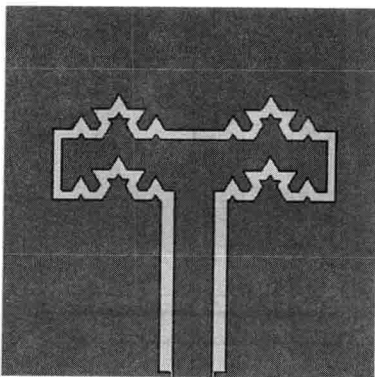


图 1.3-13 文献^[66]提出的 UWB 天线

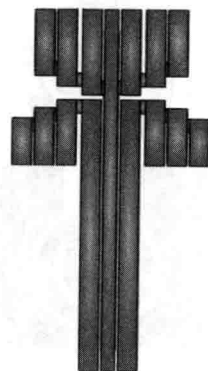


图 1.3-14 文献^[67]提出的 UWB 天线