

文章编号:1001-893X(2009)01-0092-05

## 毫米波相控阵天线单元的分析与比较\*

郭斌兴, 朱淮城

(北京遥感设备研究所 毫米波系统技术研究重点实验室, 北京 100854)

**摘要:**分析了毫米波相控阵天线单元基本特点和要求,对微带贴片、印刷偶极子、波导缝隙阵线源、Vivaldi渐变槽线等天线单元的工作原理、馈电方式、分析方法等进行了介绍和分析,最后对这几类天线单元的优缺点进行了比较,为毫米波相控阵天线单元的进一步选择、研究提供了理论参考。

**关键词:**毫米波相控阵;天线单元;馈电方式;分析与比较

**中图分类号:**TN821      **文献标识码:**A

## Analysis and Comparison of Millimeter Wave Phased Array Antenna Element

GUO Bin-xing, ZHU Huai-cheng

(National Key Laboratory of Millimeter Wave System, Beijing Institute  
of Remote-Sensing Equipment, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The characteristics and requirements of millimeter wave (MMW) phased array antenna (PAA) element are analysed, then the operating mechanisms, feed forms, analysis methods of antenna element are introduced and analysed including micro-strip patch, printed twin dipole, waveguide slotted linear array and Vivaldi tapered slot PAA. Finally, advantages and disadvantages of these elements are compared so as to provide theoretic reference for choosing and further studying MMW PAA element.

**Key words:** millimeter wave phased array; antenna element; feed form; analysis and comparison

### 1 引言

毫米波(MMW)相控阵雷达<sup>[1]</sup>兼具毫米波雷达和相控阵雷达的优点,由于其具有波束窄、带宽大、波束扫描灵活、空间功率和时间资源分配、抗干扰能力强等特点,在通信、成像、多目标跟踪、导航及弹载导引头等方面具有广阔的应用前景。

相控阵天线的辐射特性取决于天线单元的设计和单元的组阵方式。同时,不同形式天线单元的选择也影响着相控阵列的结构及馈电网络的设计。显然,设计性能满足技术指标要求的阵列单元,是毫米波相控阵天线研制的首要任务。

在毫米波段,相控阵天线常用的天线单元包括

微带贴片、印刷偶极子、波导缝隙阵线源等传统形式。同时,Vivaldi渐变槽线天线等新型天线单元的研制也为其提供了新的选择。本文首先对毫米波相控阵天线单元的基本特点和要求进行分析,然后重点介绍和分析这几类天线单元的工作原理、馈电方式、主要参数设计、分析方法等,最后对这几类天线单元的优缺点进行比较,为毫米波相控阵天线单元的进一步选择、研究提供理论参考。

### 2 基本特点及要求

相控阵天线天线单元的设计一般包括电信设计和结构设计两方面。电信设计从天线的阻抗匹配、栅瓣抑制、极化控制和功率容量等层次论证;结构设

\* 收稿日期:2008-09-17;修回日期:2008-12-12

计划需依据工作环境、材料选用、工艺加工和质量、体积、成本等方面权衡<sup>[2]</sup>。毫米波相控阵天线单元的基本特点和要求如下:

#### (1) 带宽大

毫米波(30~300 GHz, 波长1~10 mm)在大气中传输主要有35 GHz和94 GHz两个大气窗口,因此毫米波相控阵天线主要工作在Ka频段和W频段,天线单元的相对可用传输带宽大。

#### (2) 互耦影响小

天线阵元上的能量可以通过空间波耦合或表面波耦合。当互耦电平大于-20 dB时,天线的性能就会受到极大影响。互耦太大,不但会使副瓣电平变大,主瓣变形,甚至还会产生“扫描盲角”。

#### (3) 宽带阻抗匹配性好

天线阵列在波束扫描过程中,各个阵元的输入阻抗有所变化。输入阻抗决定匹配的设计,匹配越好,反射越小,驻波系数(VSWR)就越小。天线单元在较宽的带宽内有较好的驻波性能,才能实现整个阵列的宽带阻抗匹配。

#### (4) 易于加工、组织安装

相控阵雷达为避免“栅瓣”的出现,要求天线单元间距很小(一般 $0.5\lambda$ 左右)。毫米波波长很短,因而天线单元尺寸很小,对加工精度的要求非常高。采用印刷工艺、微机电(MEMS)精加工以及低温陶瓷共烧(LTCC)、微波单片集成(MMIC)技术是毫米波相控阵天线单元加工、制造的重要方向。对于共形相控阵而言,还要求阵元易共形。

#### (5) 成本低

相控阵阵列单元数目少则数百,多则数千,只有低成本才有可能应用到实际工程当中。

### 3 毫米波相控阵天线单元的分析

#### 3.1 微带贴片天线单元<sup>[3,4]</sup>

微带贴片天线是在带有金属薄层接地板的介质基片上,用光刻、腐蚀等方法制作出一定形状(矩形、圆形、环形、三角形、蝶形等)的金属贴片,它结构简单,易于共形,可以用来作为多种阵列天线的单元。在毫米波低端,微带贴片可以有超过80%的辐射效率。

##### (1) 工作原理

贴片与接地板之间激励起电磁场,并通过贴片四周的缝隙向外辐射能量。

##### (2) 馈电

有两种常用馈电结构——水平向共线微带馈电和垂直向同轴探针馈电。

用同轴线馈电的优点是馈点可选在贴片内任何所需位置,便于匹配,同轴电缆置于接地板下方,避免了对天线辐射的影响;缺点是结构不便于集成,制作麻烦。用微带线馈电(图1)时,馈线与微带贴片是共面的,因而可方便地光刻,制作简便。但这时馈线本身也要引起辐射,从而干扰天线方向图,降低增益。为此,一般要求微带线宽度 $W$ 不能太宽,希望 $W < \lambda_g$ ,这要求微带线特性阻抗 $Z_0$ 要高些或基片厚度 $h$ 小,介电常数 $\epsilon_r$ 大,通常要采用阻抗变换器进行匹配,这不仅增大了面积,而且对频带宽度也是一个极大的限制。

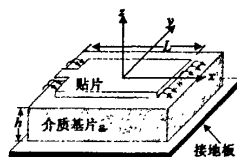


图1 平面矩形微带贴片天线单元

##### (3) 关键参数的设计

介质基片相对介电常数 $\epsilon_r$ 和厚度 $h$ 将在下文中专门讨论。

对于矩形贴片,在安装尺寸允许的条件下,金属贴片的宽度 $W_p$ 取大一些对频带效率和阻抗匹配都有利,但为了防止产生高次模引起场的畸变, $W_p$ 的尺寸不得超过式(1)给出的值:

$$W_p \leq \frac{c}{2f_0} \left( \frac{1 + \epsilon_r}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, $c$ 为光速, $f_0$ 为谐振频率。可见, $W_p$ 一般小于 $\lambda_0/2$ 。

微带矩形贴片的长度 $L$ 在理论上应选择 $\lambda_g/2$ , $\lambda_g$ 为微带线上的介质波长。但由于微带贴片的边缘效应,实际设计时值应略小于 $\lambda_g/2$ 。

##### (4) 分析方法

分析微带贴片天线的一类方法是求解贴片边缘的等效磁流分布问题,包括传输线模型法、腔模法以及多端口网络分析法等;还有一类方法是求解导体贴片以及接地板面上的电流分布,需要把全波理论(即积分方程法)和数值方法(矩量法、有限元法、时域有限差分法等)结合起来。

### 3.2 印刷偶极子天线单元<sup>[3,5]</sup>

印刷微带电路偶极子(“振子”)是切割成谐振长度的印刷导体条带,具有重量轻、体积小、成本低、便于集成和组成阵列的优点,尤其天线单元互耦小,是毫米波相控阵单元天线的重要形式之一。

#### (1) 工作原理

微波信号通过巴伦或微带馈电方式,耦合到偶极子贴片上,再由偶极子臂辐射到自由空间。

#### (2) 馈电

从馈电装置看,有微带馈电、巴伦(Balun)馈电等;从耦合方式看,包括同邻近传输线的电磁耦合、同馈线(探针)直接耦合。对于偶极子天线单元,馈电方式不同,其带宽、互耦有很大不同。其中,用巴伦馈电(如图2(a))结构克服一般偶极子单元带宽窄的缺点,在相对带宽40%的频带内,实现了驻波比(VSWR)小于2,同时也具有良好的全向特性。

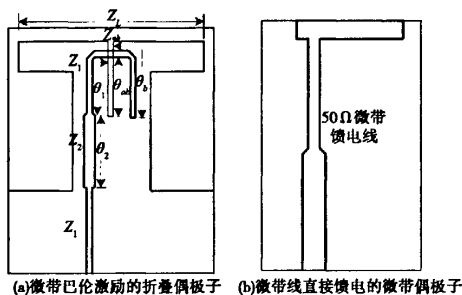


图2 印刷偶极子天线单元

在毫米波段,微带线馈电(如图2(b))应用较多。文献[5]介绍了一种新的Ka频段使用微带馈电的共面带状T型连接印刷偶极子天线。相比于微带贴片和渐变槽线等,由于其天线面积较小,天线单元互耦较小。微带线的特性阻抗只与线宽有关,而与长度无关。

#### (3) 分析方法

通常采用全波积分方程的解来研究印刷微带偶极子。

### 3.3 波导缝隙阵线源<sup>[3,6-8]</sup>

波导缝隙阵线源作为毫米波天线阵元是因其具有体积小、重量轻、口径效率高、副瓣低、馈电效率高、平面结构占用空间小以及便于一体化加工等优点,但将缝隙阵用于相控阵时,只适用于一维相扫。

常用的波导缝隙结构有窄边缝隙、纵向偏置缝隙、斜串联缝隙这3种,其中纵向偏置缝隙(如图3)

应用较广泛。

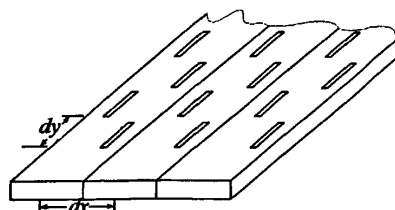


图3 偏置纵向缝隙阵

#### (1) 工作原理

缝隙开在波导壁上,当缝隙切断波导壁上的电流时,就有电流流到波导外壁,同时在缝间激励起电场,此电场可等效为沿缝轴的面电流分布,波导外壁的电流及缝上的磁流将向空间辐射电磁波。偏置纵向缝隙通过在宽边中心线两边的偏置实现180°相位变化。

若在波导终端短路且缝隙中心间距为 $\lambda/2$ 形成驻波状态,称为谐振阵;若在波导终端接匹配负载,称行波阵,工作带宽比谐振阵更宽,但有一个偏离法向的指向角 $\theta$ (是频率的函数):

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{\lambda_g} - \frac{\lambda}{2d_g} \right) \quad (2)$$

式中, $\lambda$ 为自由空间波长, $\lambda_g$ 为波导波长。

#### (2) 馈电

因为波导的高阻抗特性很容易与半波缝隙天线的高阻抗匹配,所以波导是一个给缝隙馈电的理想传输线,可以在波导中间采用裂缝耦合,也可以从辐射波导端口直接馈电,但需要一个复杂的功分网络。另外,还可采用同轴传输线或微带直接馈电的方法。

#### (3) 分析方法

对于缝隙阵,一般采用Elliott提出的有源导纳设计方法进行数值计算或采用等效磁流片法分析,采用矩量法求解。有源导纳法,利用Elliott提出的3个设计方程,依据缝隙的缝电压、波导内的模电压、孤立缝隙的电参数和缝隙间互耦值,解出天线阵面上缝隙的长度和各个缝隙的偏置量,并满足天线匹配要求。

波导缝隙天线的缺点是实验调整性差,特别是各缝隙的尺寸不易修改,其电气性能基本是通过结构尺寸的一次加工来实现的。鉴于目前的加工精度,要想成功设计出毫米波低副瓣波导缝隙阵,必须综合考虑各种影响因素,正确选择设计方法,精确计算缝隙参数。

3.4 Vivaldi 渐变槽线天线<sup>[9-13]</sup>

Vivaldi 天线是在基片敷有导体层的一个面上刻出一条指数渐张的槽线而成,另一面为介质层,槽线可分为单面槽线、双面槽线(介质两面均有导体层)。它具有体积小、重量轻、易于设计加工、便于大规模集成、增益高且随频率变化恒定等优点,最突出的是其具有很宽的工作频带范围,是毫米波段宽带相控阵天线单元的一种理想选择。

(1) 工作原理

Vivaldi 天线为底端馈电的行波天线,从结构形状上看,介质板上的槽线宽度逐渐加大,形成喇叭口向外辐射或内向接收电磁波。天线的不同部位相对于某个频率信号波长的电长度是不变的,不同频率的信号就由天线的不同部分发射或接收。所以,Vivaldi 天线具有很宽的工作带宽。文献[12]设计的 Ka 频段 Vivaldi 相控阵天线单元,VSWR < 2 时频率范围是 32 ~ 37.5 GHz,频带宽度为 5.5 GHz,实现了较宽的频带。

(2) 馈电

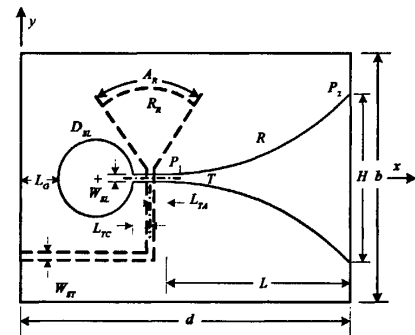


图 4 Vivaldi 天线

Vivaldi 天线具有不同的结构形式和馈电结构,

可由微带、带状线、同轴线、共面波导等馈电。图 4 为最常见的天线馈电形式,天线由三层材料组成:顶层为刻出渐变槽线的导体层,两个主要辐射面上辐射场是线性极化的,其根部的圆形槽线对微带传输线起到阻抗匹配作用;中间层为介质板;最底层是微带线(虚线),将电磁能量馈送到渐变张开的槽线部位并向外辐射,其末端为扇形结构起终端负载匹配作用。图中  $W_{ST}$  为微带线宽度,  $W_{SL}$  为槽线宽度。

(3) 关键参数设计

Vivaldi 天线的指数渐张曲线方程为

$$y = C_1 e^{Rx} + C_2 \quad (3)$$

式中,  $C_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}}$ ,  $C_2 = \frac{y_1 e^{Rx_2} - y_2 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}}$ ,  $R$  为渐张的比例因子,决定天线的波束宽度,并且  $R$  值越大,天线的驻波特性越好,变化平坦。

在  $x$  较大时,指数曲线的截断处应该能使天线工作频段内的导波辐射出去; $x$  较小时,能量会束缚在天线的导体之间。天线低频段的截止波长可以确定为槽线最大宽度的 2 倍,而天线高频段的特性则受到槽线最窄宽度的限制。

与其它行波结构的天线一样,Vivaldi 天线的增益与天线的总长度以及能量辐射的速度成正比例关系。

(4) 分析方法

时域有限差分 (FDTD) 全波分析方法是分析平面宽带 Vivaldi 天线的常用方法。

4 天线单元的比较

上述几类天线各有优缺点,为了方便对毫米波相控阵天线单元的进一步选择、研究,下面将这些天线的性能及特点进行比较和总结,如表 1 所示。

表 1 4 种天线单元的比较

特性	微带贴片	印刷偶极子	纵向波导缝隙天线	Vivaldi 渐变槽线
带宽	窄	窄	较宽	宽
增益	低	低	高	高(随频率变化恒定)
成本	低	低	较高	较低
互耦	较大	较小	较大	较大
馈电方式	微带	微带	耦合孔直接激励(馈电波导贴在辐射波导后)	微带巴伦
加工工艺	低成本光刻	印刷技术	高精度数控机床切割	印刷电路技术
其它			增益高、旁瓣低、交叉极化电平低	

对天线单元的设计除了考虑其电信、结构、系统要求外,还应结合实际工程需要,在技术指标与成本、工艺实现等之间进行折衷考虑。

另外,在进行微带贴片和偶极子天线单元设计时,须首先做好介质基片材料(介电常数 $\epsilon$ 和介质损耗正切角 $\tan \delta$ )的选择及厚度 $h$ 的确定。一方面, $h$ 比较小,有利于减小表面波的影响,同时导带的宽度也窄,有利于布线;另一方面,同微带贴片天线相比,除非采用相当厚的基片,微带偶极子带宽较窄,随着 $h$ 的增大,频带变宽,效率增加。所以,基片厚度的选择必须折衷考虑。

在毫米波段,基于微机电(MEMS)技术的天线<sup>[14]</sup>还可以通过在天线下方的介质薄膜上开孔、部分或全部刻蚀天线下方基片、或者采用MEMS表面工艺使用金属柱支撑天线贴片等方法,来降低基片介电常数,抑制表面波的传播,使天线的带宽、辐射效率、方向图等得到改善。文献[14]设计的一种MEMS层叠式毫米波天线中心频点为35 GHz,带宽11.8%,增益为7.8 dB,天线辐射效率71%。

## 5 结束语

天线单元设计是相控阵雷达研制的重要环节之一。本文介绍和讨论的几类天线单元是毫米波相控阵一些常用阵元形式,通过重点分析和比较发现,它们各自都具有一定的局限性。但随着Ansoft HFSS、CST等计算机辅助设计分析软件的广泛运用,光刻腐蚀、MEMS精加工等精密制造工艺以及低温陶瓷共烧(LTCC)、微波单片集成(MMIC)等技术的发展成熟,各种低损耗介质材料的出现,新型的天线单元将不断涌现,而传统形式的天线单元也将继续得到改进,性能不断提高,以满足毫米波相控阵雷达对天线单元的高性能、低成本等苛刻要求。

## 参考文献:

- [1] 石星.毫米波相控阵雷达及其应用发展[J].电讯技术,2008,48(1):6-12.
- [2] 束成荣,等.相控阵雷达天线[M].北京:国防工业出版社,2007:3-4.
- [3] Robert J Mailloux.相控阵天线手册[K].北京:电子工

业出版社,2007:192-214.

- [4] 毕佳明.毫米波段共形相控阵设计方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006:20-24.
- [5] Suh Young-Ho, Chang Kai. A new Millimeter wave printed dipole phased array antenna using microstrip-fed coplanar stripline tee junctions[J]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2002, 2: 1321-1324.
- [6] Elliot R S, Kurtz L A. The Design of Small Slot Array[J]. IEEE Trans. on Antennas Propag., 1978, 26(2): 214-219.
- [7] 段恒毅. 大子阵毫米波波导裂缝阵[C]//2005全国微波毫米波会议论文集. 深圳:中国电子学会,2005:320-323.
- [8] 丁晓磊,史永康,张凤林.毫米波低副瓣波导窄边缝隙行波阵的设计[J]. 遥测遥控,2007(11):168-171.
- [9] 牛军谦,吕善伟,等. Vivaldi 天线及其在宽带测量系统中的应用[J]. 宇航计测技术,2004(3):20-22.
- [10] Shin J, Shaubert D H. A parameter study of stripline-fed Vivaldi notch-antenna arrays[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1999, 47(5): 879-886.
- [11] 陈彦斌,吕善伟,李铨,等.宽频带 Vivaldi 槽线天线设计与仿真分析[C]//2005全国微波毫米波会议论文集. 深圳:中国电子学会,2005:1529-1532.
- [12] 侯付平,徐金平. Ka 波段相控阵天线单元设计及扫描盲角分析[C]//第6届全国毫米波亚毫米波学术会议论文集. 哈尔滨:中国微波学会毫米波亚毫米波专业委员会,2006:413-416.
- [13] 刘密歌. Vivaldi 宽频带微带天线的设计与仿真[J]. 现代电子技术,2007(23):95-96.
- [14] 侯芳,朱建,等. MEMS 层叠式毫米波天线设计[J]. 传感技术学报,2008(2):329-332.

## 作者简介:



郭斌兴(1982-),男,甘肃兰州人,硕士研究生,研究方向为毫米波雷达导引头总体技术、相控阵雷达技术;

Email:guobinxing2008@yahoo.com.cn

朱淮城(1945-),男,江苏淮安人,研究员,研究方向为毫米波导引头总体技术、雷达信号处理等。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>