

# 共形微带天线相控阵阵列的仿真优化设计

李 雯， 郑 爽

(黑龙江科技学院 电气与信息工程学院，黑龙江 哈尔滨 150027 )

**【摘要】**针对平面阵列天线的诸多缺点，设计了适用于工作频段 34~36 GHz 的共形相控阵天线。依据共形微带天线阵列的设计思想及方法，选取了柱面微带贴片天线做阵列辐射单元，通过 CST 软件对天线的几何尺寸进行仿真和优化设计，得出了共形天线阵的各种性能指标。仿真结果表明：在该毫米波波段下设计的共形相控天线具有优良的性能，为今后设计出最优的天线阵提供了依据。

**【关键词】**共形微带天线阵列；阵列辐射单元；CST 仿真；性能指标

**【中图分类号】**TN820

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1002-0802(2010)04-0011-03

## Design on Phase Array of Conformal Microstrip Antenna

LI Wen, ZHENG Shuang

(College of Electrical & Information Engineering, Heilongjiang Institute of Science & Technology,  
Harbin Heilongjiang 150027, China)

**【Abstract】** Aiming at the disadvantages of plane array antenna, the paper proposes the design of conformal phased array antenna applicable to 34~36 GHz frequency wave bands. According to the design and method of conformal antenna, the cylindrical microstrip cell is chosen as the phased array radiation cell. And by modeling and optimizing the geometric size of the antenna with CST software, the various performance indexes of the antenna are obtained. The simulation results show that the conformal microstrip antenna under the millimeter-wave band has excellent capabilities, and these could provide a technical support for the design of optimal conformal phased array.

**【Key words】** conformal phased array; cylindrical microstrip cell; CST software; performance index

## 0 引言

作为毫米波制导技术的一个重要发展方向，相控阵制导技术中的相控阵天线是采用电控方式扫描波束，具有扫描速度快、波束控制灵活、抗干扰能力强等特点。它可以同时完成目标搜索、跟踪、引导等多项功能，能工作在日益复杂和恶化的工作环境中。目前，相控阵天线基本上还是平面阵列天线。平面阵列天线计算模型简单，技术趋于成熟，但它存在一些缺点<sup>[1-2]</sup>，例如，波束扫描范围窄(局限在 120° 范围以内)，天线波束宽度随扫描角的增加而增加，相应天线的增益和测角精度则随扫描角的增加而降低，且难以实现宽扫描角匹配。从提高相控阵雷达性能的角度看，也有必要采用共形相控阵天线。

共形阵天线是将原来平面结构的相控阵变为曲面结构，

**收稿日期：**2009-03-20。

**作者简介：**李 雯 (1975-)，女，工程师，硕士，主要研究方向为信号与信息处理；郑 爽 (1980-)，女，硕士，助教，主要研究方向为自动控制。

并进行了薄型设计，降低了自身的质量。它扩大了波束扫描的范围；提高了天线安装的自由度；降低了雷达散射截面积 (RCS)<sup>[3-4]</sup>，可以安装在飞机等的任意位置上，通过多数天线的综合控制可以同时处理多目标，瞬时进行大范围搜索和消除盲区等，避免了平面阵列的那些缺点。正是基于此，本文对工作频段在 34~36 GHz 的典型共形相控微带天线阵进行建模与仿真优化分析，为使其成为较优良的天线提供技术支持。

## 1 共形微带阵列的设计思想及参数优化

天线的扫描特性是相控阵天线的重要技术指标，它包括扫描情况下天线的波瓣宽度和增益变化。

共形阵可以使阵元共形排列在载体表面，如果需要在方位角上提供的扫描，则需要使阵元共形在圆柱体表面，所以在设计中选用圆柱共形阵列进行建模。由阵列天线的基本理论对均匀圆柱形阵列的方向图进行仿真计算和分析，并将有

向阵元引入到圆柱共形阵列中，然后将结果推广到圆台阵列和扇形圆柱阵列的方向图分析中<sup>[3]</sup>。

### 1.1 1×4 微带共形相控阵分析

圆柱阵列的方向图特性不能用单元方向图和阵列因子的乘积形式来表示，由于单元间的互耦使单元方向图变窄，所有单元又“指”向不同的方向，所以一般情况下设计不出全向单元。

#### (1) 传输线长度的选择

天线阵列的增益在  $0.61\lambda$  时随扫描角变化起伏最小，且在同一扫描角度时此间距的增益最大。由于传输线具有  $\lambda/4$  阻抗变换特性及  $\lambda/2$  阻抗重复特性，因此选择  $0.5\lambda$ ，相控阵子阵列为 1×4 阵列，中心频率 35 GHz，对应波长为 8.571 mm。在阵元间距为  $0.5\lambda=4.2855$  mm 下，整个扫描范围内，增益指标大于 20 dB。

#### (2) 馈电方式的选择

针对矩形微带贴片天线单元，其馈电方式有两种：微带线馈电和同轴馈电方式。由于同轴馈线在焊点处的机械强度不够，容易由于弹体工作时的震动而断开，所以采用微带馈电。

用微带线馈电时，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。

天线输入阻抗与馈线特性阻抗的匹配可由适当选择馈电点位置来实现。当馈点沿矩形贴片的两边移动时，天线谐振电阻将会变化，此外馈点位置的改变将使馈线与天线间的耦合改变。在设计中经过多次调整计算得到馈电点的位置为偏离天线中心 1.2 mm 处。

#### (3) 天线阵元间的互耦分析

影响阵列天线阵元之间互耦的因素有：阵元之间的距离，即距离越大互耦越小；阵元是否分布在另一个阵元的辐射方向图的比较强的部分，如果彼此都在对方辐射比较强的方向上，则耦合就比较明显；对于线阵来说，平行阵比共线阵耦合强烈。设计中将综合对以上各因素加以考虑。

### 1.2 1×4 微带共形相控阵设计

因矩形贴片单元在制版、微带线馈电及匹配等方面较其它形状贴片有明显的优势，故阵列的辐射单元采用矩形贴片。

依据设计目的及结合传统矩形贴片天线的设计方法，选取贴片的介质相对介电常数  $\epsilon_r=2.2$ ，相对磁导率  $\mu_r=1$ ；阵列单元曲率  $r=200$  mm；天线工作频率  $f_0=35$  GHz；自由空间波长  $\lambda_0=8.571$  mm，单元间传输线的长度为  $d=0.5\lambda=4.285$  mm。

在确定了矩形微带贴片单元形式和介质基片参数后，即可以决定贴片单元的宽度  $W$ 。因为对于工作在主模 TM<sub>01</sub> 模的矩形微带贴片天线长度近似为  $\lambda_g/2$ ，而介质内的波长  $\lambda_g = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$ 。这里  $\epsilon_e$  为介质基片的有效介电常数，由边缘效

应决定， $\epsilon_e$  的经验公式为：

$$\epsilon_e = \frac{(\epsilon_r+1)}{2} + \frac{(\epsilon_r-1)}{2}(1 + \frac{10h}{W})^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中  $W$  是一个宽度的度量，既可以是宽边，也可以是窄边。由此可见  $\epsilon_r$  和  $h$  确定后， $\epsilon_e$  就由宽度  $W$  决定了<sup>[5]</sup>。而  $W$  的尺寸对微带天线各方面性能均有影响，且同时考虑到防止产生高次模引起场的畸变，宽度  $W$  的尺寸不得超过下式给出的值：

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

式中  $c$  为光速， $f_0$  为谐振频率，由此可见  $W$  总是小于  $\lambda_0/2$  的值。

矩形微带贴片天线的长度  $L$  在理论上近似为  $\lambda_g/2$ ，但工程实际上由于边缘场的影响，在确定  $L$  的尺寸时应从  $\lambda_g/2$  中减去  $2\Delta L$ 。 $\Delta L$  的值由下式给出：

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_e + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(W/h + 0.8)}, \quad (3)$$

于是：

$$L = 0.5\lambda_g - 2\Delta L. \quad (4)$$

由此可见， $L$  不仅与  $\epsilon_r$ 、 $W$  有关，还与厚度  $h$  有较大关系。

根据微带天线的基本理论及公式计算出天线相关参数，并用软件 CST 对微带贴片天线仿真和优化，最后选取天线的长、宽、高分别为  $L=4$  mm， $W=6$  mm， $H=0.5$  mm；馈线宽度为  $w=0.24$  mm。

## 2 共形相控阵列的建模与仿真分析

共形阵可以使阵元共形排列在载体表面，如果需要在方位角上提供的扫描，则需要使阵元共形在圆柱体表面，所以设计中选用简单的圆柱共形阵列进行建模。并由阵列天线的基本理论对均匀圆柱形阵列的方向图进行仿真计算和分析<sup>[5]</sup>。

根据以上各优化参数，在 CST 软件中构建一个圆柱体，然后建立一个贴片柱，在圆柱体上生成一个贴片柱面，取柱面与贴片柱的公共部分，这样就可在圆柱体上建立共形天线阵模型，其结构如图 1 所示。

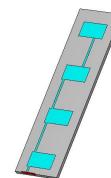


图 1 1×4 共形相控阵天线模型

1×4 共形相控天线模型建立后，即可对其进行仿真研究。仿真得出 S 参数的变化曲线如下页图 2 所示。图 2 中  $S$  参数到达极值点 -29.08 dB，带宽为 5.7%。

三维辐射方向图(天线方向图)如下页图 3 所示。图 3 中主瓣颜色越深的地方说明辐射性越强，也就是天线阵元的叠加结果。由图 3 中亦可看出：阵元个数越多，其方向图的波瓣宽度越窄，天线的方向性性能越佳。图 3 中参数为：

Type=Farfield (Array); pproximation=enabled(kR>>1); Monitor = farfield (f=35) [1]; Component =Abs; Output =Gain; Frequency =35 ; Rad.effic.=1.133 ; Tot.effic.=1.130 ; Gain=13.64 dB.

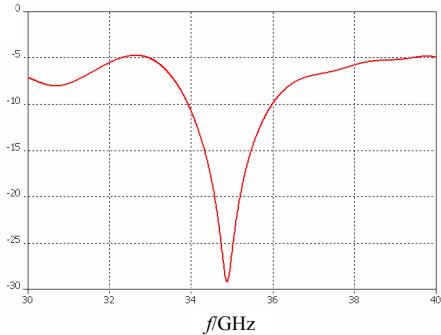


图 2 S 参数曲线

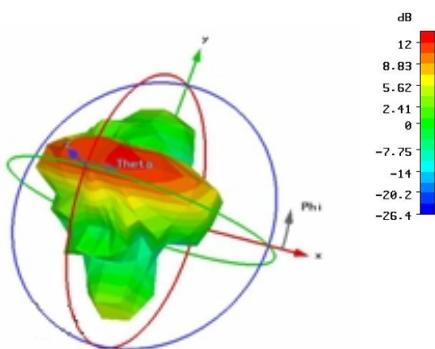


图 3 天线阵的远场方向

三维图虽给出了辐射方向图的很好的总体印象,但不能提供定量信息<sup>[6]</sup>。为了直观了解天线阵的主副增益,3 dB 波束宽度及辐射方向,做出其极坐标下的二维图,即共形相控阵的E面方向图和H面方向图,分别如图4、5所示。

图 4 里面的参数为: Frequency=35; Main lobe magnitude=13.1 dBi; Main lobe direction=5.0 deg.; Angular width[3dB]=17.5 deg.; Side lobe level=-7.6 dB。图 5 里的参数为: Frequency=35; Main lobe magnitude=5.8dBi; Main lobe direction=5.0deg.; Angular width[3dB]=275.0 deg.; Side lobe level=-2.1 dB。

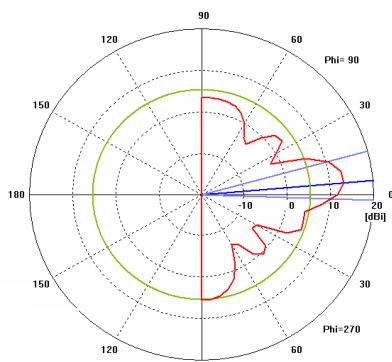


图 4 天线阵的 E 面方向

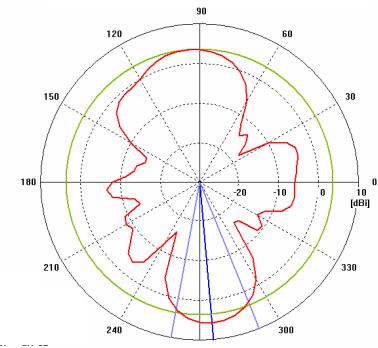


图 5 天线阵的 H 面方向

仿真得到天线阵的增益为 13.64 dB; E 面主瓣宽度 17.5°; E 面副瓣电平 -7.6 dB; H 面主瓣宽度 32.7°; H 面副瓣电平 -2.1 dB; 输入阻抗 99.16 Ω。

### 3 结语

选取阵元时要考虑到柱面微带贴片单元的增益高、厚度小、谐振频率高、方向图均匀,且易加工制作在弹体上,因此柱面微带天线单元可作为共形相控阵天线中的辐射单元。

根据所得的仿真数据分析,当柱面的半径很大时,单元的曲率对天线的影响很小,频率略有偏移。设计中选取曲率半径为 200 mm,此时谐振频率为 34.924 GHz, S11 参数在谐振频率上达到了 -29.08 dB。

对于阵列天线的间距选择要考虑传输线的阻抗变化特性,同时还要考虑天线阵的增益,设计中选择 0.5 λ 长度的传输线。

通过对大量仿真数据进行分析,可得出方向图随阵元个数的变化的特点为:阵元个数越多,其方向图的波瓣宽度越窄,天线的方向性性能越佳。如果阵元个数沿 H 面或 E 面的阵元个数相同,那么天线阵在该方向的方向图具有大抵相同的方向性。

### 参考文献

- [1] 郝凤玉,周希朗.一种新型超宽带平面单极微带天线的设计与研究[J].通信技术,2008,41(01):25~27.
- [2] 刘颖,李萍.新型宽带容性馈电微带天线单元仿真设计[J].通信技术,2008,41(11):47~48.
- [3] 张福顺,焦永昌,马金平,等.弹体上 S 波段微带共形天线阵[J].电波科学学报,1998,13(02):209~212.
- [4] 余彦民,赵建中,吴文.共形环状毫米波微带天线研究[J].制导与引信,2005,26(03):43~46.
- [5] 王扬智,张麟兮,韦高.基于 HFSS 新型宽频带微带天线仿真设计[J].系统仿真学报,2007,19(11):2603~2606.
- [6] Vaskelainen L I. Phased Synthesis of Conformal Array Antennas[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat, 2000, 48(06): 987~991.

## 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，一直致力于专注于微波、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>