

# 一种毫米波段圆锥共形低副瓣微带天线设计\*

刘 敏, 冯子睿, 吴 群

(哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院 哈尔滨 150001)

**摘要:**设计了一种工作在毫米波段的  $1 \times 8$  圆锥共形低副瓣微带天线阵列。分析了 T 型结构功分器的基本原理,采用底边馈电方式设计矩形微带贴片单元,利用该单元和并联馈电网络构成  $1 \times 8$  等功分微带天线阵,根据 T 型结构功分器原理设计了一个服从切比雪夫分布的  $1 \times 8$  圆锥共形低副瓣微带天线阵。采用基于有限积分算法 (FI) 的 CST 三维电磁仿真软件对两种天线阵进行了分析和对比,结果表明两者均工作在毫米波段,后者虽然实现了低副瓣性能,但是相对于前者,其增益稍有下降且波束宽度有所展宽。

**关键词:**毫米波段; 微带天线阵; 圆锥共形; 低副瓣; T 型结功分器

**中图分类号:**TN820.1 + 3    **文献标识码:**A    **文章编号:**CN11-1780(2008)05-0019-05

## 引 言

现代海战中,舰队作战指挥系统应具有快速反应能力,及互联网化、系列化、模块化等特点,这对舰载雷达设备、通信设备的天线系统提出了更高的要求。随着电子信息技术的发展,作战海域的电磁环境越来越复杂,电子干扰威胁越来越严重,迫切要求舰载雷达系统能够拥有更强的抗电子干扰、抗反辐射导弹、抗雷达探测、抗高速反舰导弹的低空和超低空打击的能力。为了有效地对抗目标,提高雷达抗干扰的能力,对雷达天线提出了低或超低副瓣的要求<sup>[1,2]</sup>。目前,低副瓣天线已经成为高性能电子系统的一个重要组成部分,特别是在有严重地物和电子干扰的环境中有效地工作,必须采用副瓣尽可能低的天线。

微带天线具有低剖面、重量轻、体积小、易于实现共形等一系列优点<sup>[3]</sup>,可以制成与各种航空、航天、舰船及地面车辆等载体表面共形的结构,充分地利用载体表面空间,便于实现设备的小型化,因此微带天线特别适合用来做低副瓣天线。低副瓣微带天线具有良好的对抗电子干扰的能力,所以对低副瓣微带天线的研究具有重要的工程价值和国防意义。

随着毫米波固态器件、超大规模集成电路和超高速集成电路的发展,毫米波导引头和弹载信号处理机体积将变得更小,灵活性和实用性更强<sup>[4]</sup>。这必然导致各种“灵巧”导弹、“末敏”炮弹大量出现在现代战场上。而对付这种“近身”威胁的办法就是,发展装有毫米波段具有快速反应能力和抗干扰能力的低副瓣天线的电子对抗设备,因此开发毫米波段低副瓣天线阵是当务之急。

基于上述考虑,本文设计了一种工作在毫米波段的  $1 \times 8$  圆锥共形低副瓣微带天线阵。该阵列的矩形微带贴片天线单元采用底边馈电方式进行馈电,采用并联馈电方式设计等功分  $1 \times 8$  天线阵,基于 T 型结构功分器原理和切比雪夫分布设计了不等功分的  $1 \times 8$  圆锥共形天线阵。通过 CST 电磁仿真软件对两种天线阵的性能进行分析和对比,仿真结果验证了设计的合理性和正确性。

## 1 T 型结构功分器的理论分析

T 型结构功分器具有结构简单、占据空间小、容易实现不等功分等优点,设计中采用 T 型结构功分器构成不等功分并联馈电网络<sup>[5]</sup>。无耗传输线模型的 T 型结构功分器如图 1 所示,如果结处的电压是  $V_0$ ,则输入功率为

\* 基金项目:航空科学基金资助项目(20060112105),CAST 创新基金资助项目(CAST200610)

收稿日期:2008-05-23 收修改稿日期:2008-07-11

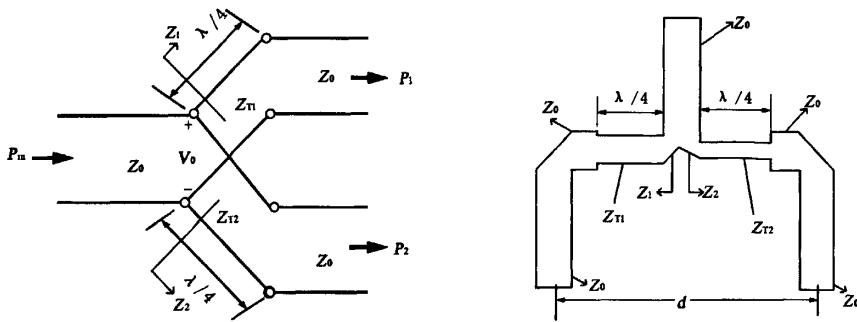


图 1 T 型结构功分器示意图

$$P_{in} = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{Z_0} \quad (1)$$

T 型结每一边输出端口的输出功率为

$$P_1 = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{Z_1}, P_2 = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{Z_2} \quad (2)$$

由于使用的是无耗模型,所以总的输出功率

$$P_{out} = P_1 + P_2 = P_{in} \quad (3)$$

因此,对于不等功分器功率分配为

$$P_1 = KP_{in} \quad (4)$$

$$P_2 = (1 - K)P_{in} \quad 0 < K < 1$$

由式(1)~(4),可以得到每一边的输入阻抗为

$$Z_1 = \frac{Z_0}{K} \quad (5)$$

$$Z_2 = \frac{Z_0}{1 - K} \quad (6)$$

这样,T型结右边总的输入阻抗等于 $Z_1$ 与 $Z_2$ 的并联阻抗,满足匹配条件。四分之一波长变换器 $Z_{T1}$ 和 $Z_{T2}$ 匹配到输出端口特性阻抗 $Z_0$ 的计算公式为

$$Z_{T1} = \sqrt{Z_0 Z_1} \quad (7)$$

$$Z_{T2} = \sqrt{Z_0 Z_2} \quad (8)$$

实际上,T型结构功分器不是无耗的,其输出功率 $P_{out} = P_{in} - P_{loss}$ ,其中 $P_{in}$ 是输入功率, $P_{loss}$ 是介质损耗、欧姆损耗和辐射损耗的总和。功率比 $P_1/P_2$ 同无耗情况是非常相似的,如图 1 所示,T型结两边的微带形式几乎是对称的,因此从功分器的输入端口到每个输出端口的损耗基本相等。为了方便起见,在以下的设计中将 T 型结构功分器近似当作无耗处理。

## 2 等功分微带天线阵优化设计

### 2.1 微带天线单元的建模与仿真

微带贴片天线因其体积小、重量轻、剖面薄、易于与载体共形、易于实现线极化或圆极化等优点而闻名于天线领域,被广泛地应用于飞机、导弹等通讯控制设备中。微带贴片天线阵可采用矩形、圆形、环形和三角形等贴片形状,它们各有特点,考虑到布阵和微带线馈电及匹配等因素,本文采用矩形微带贴片天线。微带贴片天线的馈电方式包括微带线馈电和同轴线馈电等方式,而微带线馈电又包括中心微带馈电和偏心微带馈电等方式。本文采用文献[6]中的底边馈电方式对矩形微带贴片单元进行馈电,其原理可用图 2 所示的天线单元来说明。

矩形微带贴片单元的仿真结果如图3所示。图3中,(a)为该单元的反射损耗 $S_{11}$ 图,(b)为二维远场波瓣图。从仿真结果可看出,该天线单元工作在毫米波段,在谐振频率35GHz处,天线单元的带宽(VSWR=2)达到1.89GHz,天线的增益达到7.3dB。

## 2.2 1×8等功分馈电网络设计

馈电网络的设计原则是保证各阵元所要求的激励振幅和相位,以便形成所要求的天线方向图或使天线某项指标最佳,因此要求馈电网络具有良好的输入阻抗匹配、尽量小的馈电损耗、较宽的工作频带和简单的结构。本文所采用的并联馈电网络即具有上述特点。设计中采用一分二的T型结构等功分器对各贴片

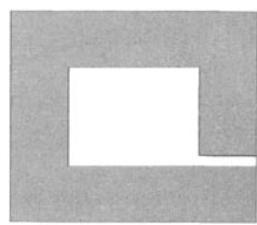
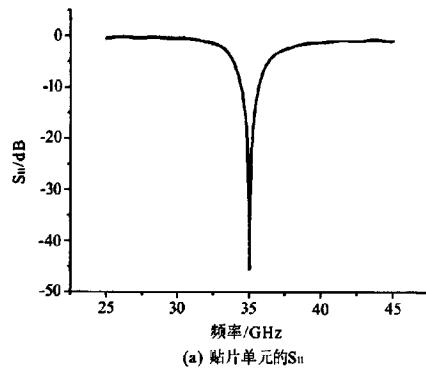
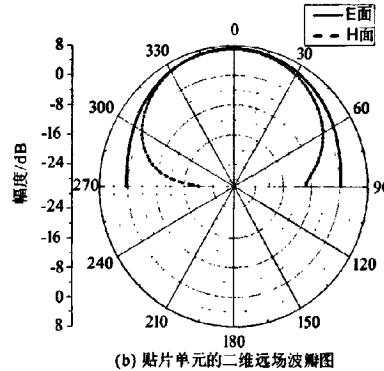


图2 微带天线单元  
模型示意图



(a) 贴片单元的 $S_{11}$



(b) 贴片单元的二维远场波瓣图

图3 底边馈电单元的仿真结果

单元馈电,使各单元馈线长度完全相等,保持各天线单元的激励等幅同相,采用逐段匹配的方法,每段分别用四分之一波长阻抗变换器使该段的输入阻抗与馈线的特性阻抗匹配,从而使整个并联馈电网络具有良好的匹配效果。设计的1×8等功分馈电网络表面功率流分布如图4。从图4可见,1×8并联馈电网络实现了良好的等功分效果。

## 2.3 1×8等功分微带天线阵设计与仿真

基于前面设计的底边馈电矩形微带贴片单元和等功分馈电网络,设计了一个1×8等功分微带天线阵,其模型如图5所示,该天线阵的仿真结果如图6所示。图6中,(a)为1×8等功分微带天线阵的反射损耗 $S_{11}$ 图,(b)为二维远场波瓣图。从仿真结果可以看出,天线阵同样工作在毫米波段,其中心频率为35GHz,带宽(VSWR=2)约为1.43GHz,中心频率处的增益达到16.0dB,第一副瓣电平为-13.2dB,3dB波束宽度约为9.8°。

## 3 圆锥共形低副瓣微带天线阵优化设计

### 3.1 不等功分馈电网络设计

实现天线低副瓣的方法主要有改变阵列各单元的电流幅度分布(幅度加权)、改变阵列各单元的相位(相位加权)和改变阵列各单元的间距(密度加权)等。当阵元数比较小时,常采用幅度加权方法,如切比雪夫分布和泰勒分布等。切比雪夫天线阵的特点是在给定的副瓣相对电平的条件下,能够得到最窄的主瓣宽度,或者在给定主瓣宽度的条件下能获得最低的副瓣电平,而且是等副瓣的,但是切比雪夫阵在降低天

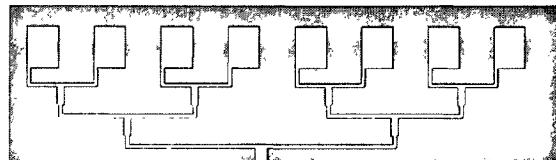


图4 1×8等功分馈电网络表面功率流分布

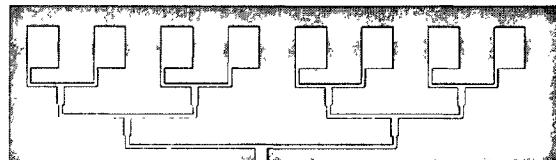
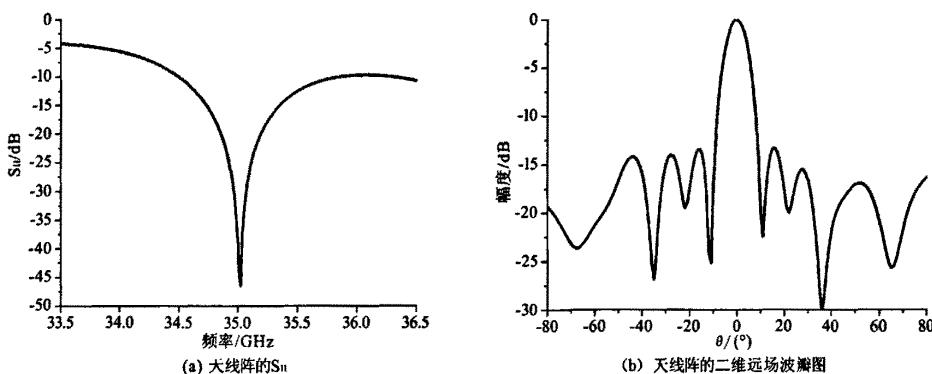


图5 1×8等功分微带天线阵示意图

图 6  $1 \times 8$  等功分微带天线阵的仿真结果

线副瓣的同时,也会展宽波瓣宽度<sup>[7,8]</sup>。

本文采用 VBA 语言编程计算服从切比雪夫分布的  $1 \times 8$  微带天线阵电流幅值比,如表 1 所示。在设计中,为了设计方便和有效性,将表 1 的电流幅值比简化如表 2 所示。

基于 T 型结构功分器的理论和表 2 中的幅值比,设计了一个不等功分并联馈电网络,其表面功率流的分布情况如图 7 所示。从

图 7 可以看出,该  $1 \times 8$  不等功分并联馈电网络实现了良好的不等功分效果。

### 3.2 圆锥共形低副瓣微带天线阵的设计与仿真

基于前面设计的底边馈电矩形微带贴片单元和不等功分馈电网络,设计了一个  $1 \times 8$  圆锥共形低副瓣微带天线阵,其模型如图 8 所示。该天线阵的仿真结果如图 9 所示。图 9 中,(a)为圆锥共形低副瓣微带天线阵的反射损耗  $S_{11}$  图,(b)为二维远场波瓣图。从仿真结果可看出,天线阵工作在毫米波段,其中心频率为 35GHz,带宽( $VSWR = 2$ )约为 1.69GHz,中心频率处的增益达到 15.8dB,第一副瓣电平达到  $-30.5$  dB,3dB 波束宽度约为  $18.0^\circ$ 。对比前面等功分  $1 \times 8$  平面天线阵的仿真结果可知,该天线阵虽然实现了低副瓣的效果,但是其增益略有下降,而且其 3dB 波束宽度展宽了不少,这正是下一步研究需要解决的问题,即在降低副瓣电平的同时尽量保证天线阵增益和波束宽度不变。

表 1  $1 \times 8$  微带天线阵电流幅值比

第 $n$ 单元	1	2	3	4	5	6	7	8
电流幅值比	1	1.72	2.58	3.11	3.11	2.58	1.72	1

表 2 简化后的  $1 \times 8$  微带天线阵电流幅值比

第 $n$ 单元	1	2	3	4	5	6	7	8
电流幅值比	1	1.5	2.5	3	3	2.5	1.5	1

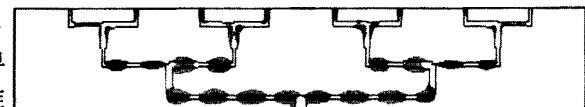
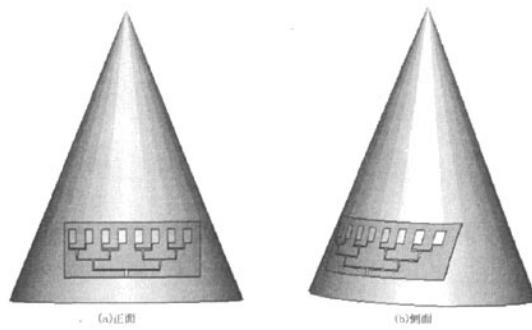
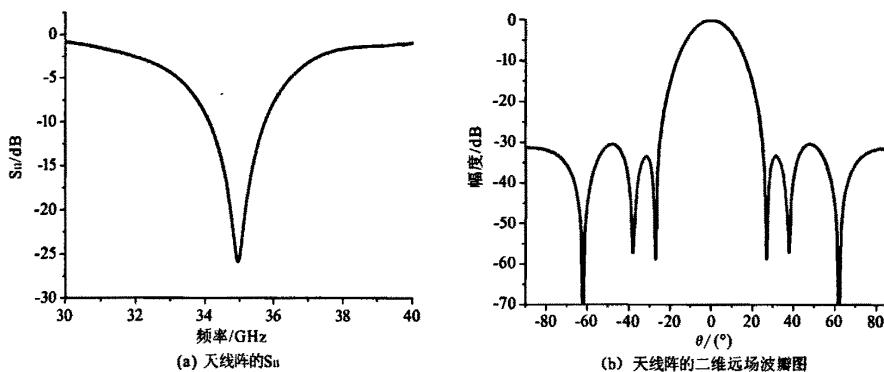
图 7  $1 \times 8$  不等功分馈电网络表面功率流分布

图 8 圆锥共形低副瓣微带天线阵示意图

## 4 结 论

本文设计了一种工作在毫米波段的  $1 \times 8$  圆锥共形低副瓣微带天线阵。首先分析了 T 型结构功分器的设计原理,采用底边馈电方式设计矩形微带贴片天线,利用该单元和并联馈电网络设计出  $1 \times 8$  等功分微带天线阵。基于 T 型结构功分器原理设计了服从切比雪夫分布的不等功分馈电网络,并利用该馈电网络设计了一个工作在毫米波段的  $1 \times 8$  圆锥共形低副瓣微带天线阵。利用 CST 三维电磁仿真软件分析和

图9  $1 \times 8$  低副瓣微带天线阵的仿真结果

对比了平面和共形天线阵的性能,结果表明后者虽然实现了低副瓣特性,但是其增益比前者略有下降,而且其波束宽度也比前者展宽了不少。这是目前低副瓣天线普遍存在的一个弊端,因此也是下一步研究需要解决的问题,即在保证增益和波束宽度不变的情况下,尽量降低副瓣电平,从而提高该圆锥共形低副瓣天线阵在现代通信、军事等应用领域的有效性和适用性。

### 参考文献

- [1] Balanis C. Antenna Theory Analysis and Design [M]. John Wiley and sons, Inc. New York, 1982, 1 ~ 20.
- [2] 赵国庆等. 雷达对抗原理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [3] Pozar M and Targonski S D. Improved Coupling for Aperture - coupled Microstrip Antennas [J]. Electron. Lett. 1991, 27 (13): 1129 ~ 1131.
- [4] 林东旭, 彭宏利. 圆柱体共形阵列微带天线远区场辐射方向图计算 [J]. 现代引信, 1998, (2): 23 ~ 27.
- [5] Mauricio Sanchez Barbetti. Design and Implementation of a Transceiver and a Microstrip Corporate Feed for Solid State X - band Radar [J]. 2006; 3 ~ 10, 25 ~ 40.
- [6] 刘敏, 冯子睿, 孙凤林, 吴群. Ka 波段  $4 \times 4$  圆锥共形微带天线阵列设计 [C]. 2007 年全国微波毫米波会议论文集.
- [7] Dolph C L. A Current Distribution for Broad Side Arrays Which Optimizes the Relationship between Beam Width and Side Lobe Level [J]. Proc. IRE, 1946, 34 (6): 335 ~ 348.
- [8] Jazi S. A New Formulation for the Design of Chebyshev Arrays [J]. IEEE Trans. Antennas Propagate, Mar. 1994, 42: 439 ~ 443.

## A Millimeter Wave Band Conical Conformal Low Sidelobe Microstrip Antenna Array

Liu Min, Feng Zirui, Wu Qun

**Abstract:** Design of a millimeter-wave conformal low sidelobe microstrip patch antenna  $1 \times 8$  elements array on a cone surface is presented. The hemline feed method (HFM) is used to design the patch element. This kind of elements and parallel feed network are used for forming the conformal low sidelobe microstrip antenna array based on the design principle of Dolph-Chebyshev distribution and T-junction power divider. The radiation features of the array are discussed to illuminate the realization of a low sidelobe level ( $-30.5\text{dB}$ ) of the array. Simulations by the CST MICROWAVE STUDIO are given to verify this present design.

**Key words:** Millimeter wave band; Microstrip antenna array; Conical conformal; Low sidelobe; T-junction power divider

### [作者简介]

刘敏 1984 年生, 硕士研究生, 电磁场与微波技术学科。主要研究方向为共形相控阵天线。

冯子睿 1982 年生, 硕士研究生, 电磁场与微波技术学科。主要研究方向为共形相控阵天线。

吴群 1955 年生, 现为哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院教授、博导, 博士, 毫米波系统技术重点实验室兼职研究员。主要从事微波毫米波电路与器件, 天线与电磁兼容性。发表论文 80 余篇。

## 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>