

文章编号: 1671-0576(2022)03-0021-05

一种新型网格微带单脉冲天线

花鹏成, 谢国君, 宋 诚, 骆定一, 张立东

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘 要: 提出了一种新型网格微带单脉冲天线设计方法, 分别给出了驻波曲线和辐射方向图的仿真结果。该天线的辐射单元采用网格微带的形式, 仅通过微带辐射单元的不同宽度实现阵面的锥削分布设计, 克服了传统波导缝隙天线设计复杂和加工精度要求高的缺点, 工程实现较为简单。仿真结果表明, 该天线具有 2.8% 以上的相对带宽 (驻波不大于 2) 以及优于 -20 dB 的副瓣性能。

关键词: 单脉冲天线; 泰勒分布; 微带天线

中图分类号: TN82

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2022.03.004

Novel Grid Microstrip Monopulse Antenna

HUA Pengcheng, XIE Guojun, SONG Cheng, LUO Dingyi, ZHANG Lidong

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: A novel design method of grid microstrip monopulse antenna is introduced, and the simulation results of voltage standing waves ratio (VSWR) and radiation pattern are given respectively. The radiation element of the antenna is in the form of grid microstrip. The taper distribution of array surface is required by the different width of microstrip radiation element, which overcomes the shortcomings of traditional wave guide slot antenna, such as design complexity and high accuracy. The implementation is relatively simple. The simulation results show that the relative bandwidth of the antenna is 2.8% (VSWR is not more than 2), and the side lobe amplitude of the antenna is better than -20 dB.

Key words: monopulse antenna; Taylor distribution; microstrip antenna

0 引言

单脉冲天线是单脉冲雷达重要的电磁波发射

与接收装置, 为雷达同时提供和、方位差、俯仰差 3 通道信息, 可以通过天线发射的和差波束在一个回波脉冲内获得目标的位置信息^[1]。传统的单脉冲雷达多采用反射面、微带和波导缝隙等天线形式^[2]。单脉冲反射面天线一般采用 4 波导或 5 波导馈源结构, 容易实现单脉冲天线性能且结构简单。但反射面天线纵向尺寸较大, 在结构尺寸

收稿日期: 2021-11-02

作者简介: 花鹏成 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事天线技术研究。

受限时,往往因馈源遮挡导致天线效率低、副瓣电平差。微带天线具有质量轻、易与电路集成、成本低等特点。但由于微带天线介质损耗较大,造成馈电网络损耗大,致使天线效率降低,往往难以实现较高的增益^[3-4]。波导缝隙天线通过在波导宽壁上不同位置处开缝,切割电磁波达到辐射能量的目的,具有增益高、副瓣低且性能稳定的特点,是目前应用最广泛的导引头单脉冲天线之一。波导缝隙天线辐射缝隙的长度、宽度及偏离波导中心的距离等参数共同决定了阵面的锥削分布^[5-6],因此,波导缝隙天线设计较为复杂,加工精度要求高。

为解决上述问题,本文设计了一种新型的微带网格阵面结构及相应的环形耦合微带功分器。通过天线辐射阵面与和差器的联合设计,在不降低天线阵列性能的基础上,采用微带天线实现相同的功能。

1 天线阵面的设计

1.1 辐射原理

本文采用了一种新型的微带网格阵面结构。与普通波导缝隙阵面结构相比,该结构具有剖面低,重量轻,成本低等优点。天线阵面为四象限对称布局,1/4微带网格天线阵面结构如图1所示。天线纵向微带线为有效辐射单元,长度为 $\lambda/2$,其中 λ 为电磁波在微带板中的有效波长,横向微带线是传输线,长度为 λ 。

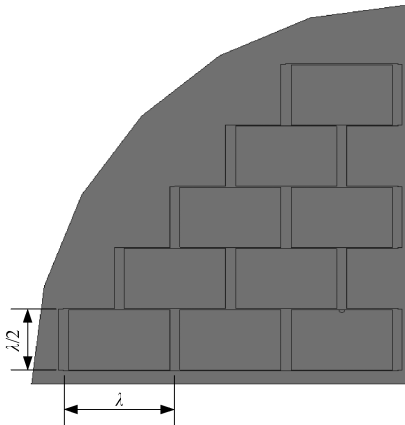


图1 1/4微带网格天线阵面结构

在由微带线组成的每一个矩形环上,短边上有相同半波电流,而长边上有全波电流,其结果是

纵向分量同相叠加,横向分量相互抵消。微带线的宽度和微带线与馈电点间的距离决定了纵向微带线的电流分布。可以通过调整纵向微带线的宽度来改变每个辐射单元的电流大小,使阵面电流分布符合泰勒分布,实现减小副瓣的目的。

在微带网格天线阵的设计中,无论采取线阵还是面阵结构,都需要确定长边和短边长度。为了确定长边长度,需要首先确定有效波长 λ ,其求解的经验公式为

$$\lambda \approx a\lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

式中: a 为待定常数; λ_0 为电磁波在自由空间中的波长; ϵ_r 为介电常数的实部。本文 a 取值为1.02, ϵ_r 取值为2.2,使用罗杰斯5880板材设计微带网格天线阵。

采用HFSS软件对天线H面和E面的电场矢量分布进行仿真,结果如图2所示。

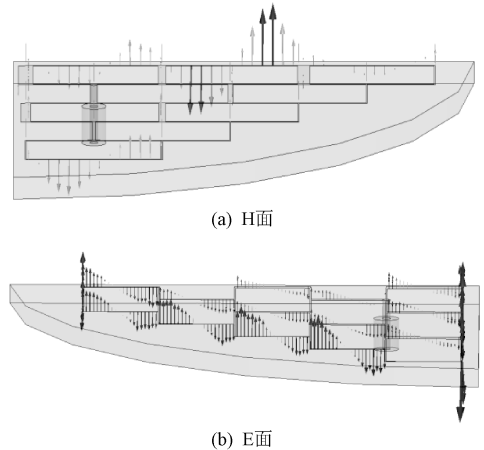


图2 天线电场矢量分布图

从图2可以很直观地看出,在工作中心频率 f_0 处,微带网格长边上的电流矢量呈现全波长分布,短边上的电场矢量呈现半波长分布。

天线微带网格矩形环的长边基本上作为传输线工作,而短边则既为辐射单元,又有传输线的作用。假设瞬时电流呈驻波分布,在所有的短边上的电流都同相,使得所有短边辐射因为同相叠加而增强;而所有网格长边上的电流成对反相,使得长边辐射(理想状态下)抵消为零。所以该网格天线阵列的增益正比于短边的数量。采用HFSS软件进行仿真,通过天线微带线上的电流密度分布可知,长边上的电流是互相抵消的,而短边上电流沿同一方向增强。

1.2 阵面加权设计

在完成天线的初步设计后,根据天线具体的使用要求,进行阵列天线方向图综合。天线方向图综合一般先确定天线辐射方向图要求,再用系统方法来设计满足方向图要求的天线结构参数和电参数,如阵元间距、阵元数量、激励幅度、激励相位等。

常用的天线方向图综合方法一般分为3类。第一类方法是提出主瓣宽度和旁瓣电平的要求,然后确定阵因子中辐射单元的激励幅度或者相位等。常见的方法有多尔夫-切比雪夫(Dolph-Chebyshev)综合法和泰勒(Taylor)线源综合法。这两种方法都是采用切比雪夫(Chebyshev)多项式来获得指定旁瓣下的最窄主瓣宽度,但Taylor线源综合法相比Dolph-Chebyshev综合法来说,可以避免高Q值或者窄带工作。第二类方法是对方向图形状进行设计,通过确定单元数量、间距分布和激励,用综合的最佳阵因子取代预期方向图。常见的方法有傅里叶变换法和伍德沃德-劳森(Woodward-Lawson)法。第三类方法是利用微扰法来不断调整已知的方向图来实现所需要的方向图指标。

Dolph-Chebyshev综合法的重要特性是:若指定主副瓣比值(即指定旁瓣电平),则第一零点的波束宽度最窄;若指定波束宽度,则主副瓣比值最大。因此Dolph-Chebyshev综合法适合方向性强和波束窄的天线方向图综合。但上述特性会导致天线工作频带偏窄。Taylor线源法采用Chebyshev多项式的改进形式,可以避免窄带工作,更适合于激励的优化。在对天线方向图优化时,本文主要采用的是第一类方法中的Taylor线源法。

本文设计的微带网格天线方位面上有8个有效辐射单元,俯仰面上有6个有效辐射单元,旁瓣电平优化指标为 -30 dB,等副瓣数为5。根据泰勒阵列综合公式^[7-9],计算得到方位面8个辐射单元的电流比为 $0.4407 : 0.8017 : 1.2414 : 1.5163 : 1.5163 : 1.2414 : 0.8017 : 0.4407$,俯仰面6个辐射单元的电流比为 $0.4806 : 1.0324 : 1.4869 : 1.4869 : 1.0324 : 0.4806$ 。将方位面电流分布和俯仰面电流分布一一相乘,便能得到整个阵面的电流分布。

在得到电流分布后,就可以计算微带线的阻抗。在微带网格天线阵列中,每个辐射单元可视为并联后再次串联,得到电流比后,阻抗比就是电流的反比。方位面8个辐射单元的阻抗比为 $2.2693 : 1.2473 : 0.8056 : 0.6595 : 0.6595 : 0.8056 : 1.2473 : 2.2693$,俯仰面6个辐射单元的阻抗比为 $2.0806 : 0.9686 : 0.6725 : 0.6725 : 0.9686 : 2.0806$ 。设并联后总阻抗为 50Ω ,利用微带线计算工具可分别求得各天线阵元阻抗。在求得所有辐射单元的微带线宽度后,对整个阵面的方向图进行仿真计算,根据计算结果再对微带线宽度进行微调,多次迭代以达到最佳工作状态。因天线边缘电流分布很小,导致求得的微带线宽度过小,工程中无法实现。把过小的微带线宽度均改为 0.2 mm,再次进行整体优化,最终得到整个阵面辐射单元的微带线宽度。优化后的微带线宽度最小值为 0.18 mm,工程中可以实现,且不易脱落。

2 天线和差器设计

天线和差器由4个微带形式的混合环形网络组成,混合环形网络如图3所示。端口1和端口2为混合环形网络的输入端口,端口3和端口4分别为其差端口与和端口。当端口1和端口2同相等幅输入时,差端口与输入端口的相差为 180° 。

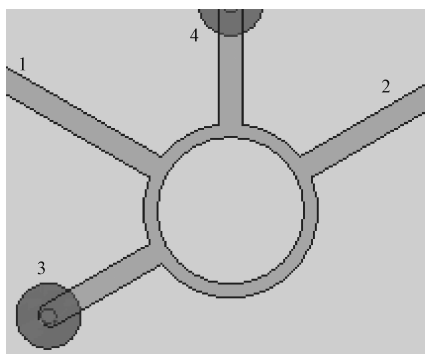


图3 混合环形网络

该和差器有8个端口,其中端口1~端口4通过金属通孔与上层的微带辐射阵面连接,端口5~端口8分别为和端口、俯仰差端口、方位差端口和匹配端口,如图4所示。

和差器的传输性能如图5所示,其中 S_{51} ,

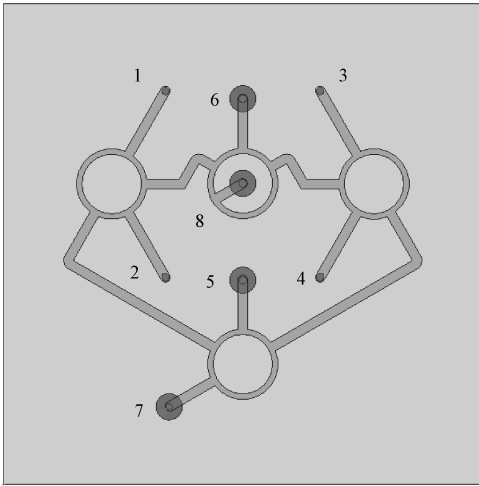


图 4 和差器

S_{52}, S_{53}, S_{54} 分别为和端口到 4 个 $1/4$ 辐射阵面的传输系数。可以看出, 传输系数 $S_{51}, S_{52}, S_{53}, S_{54}$ 基本相等, 均为 -6.0 dB 左右。考虑微带板和微带线的插入损耗, 最终仿真结果为 -6.2 dB。

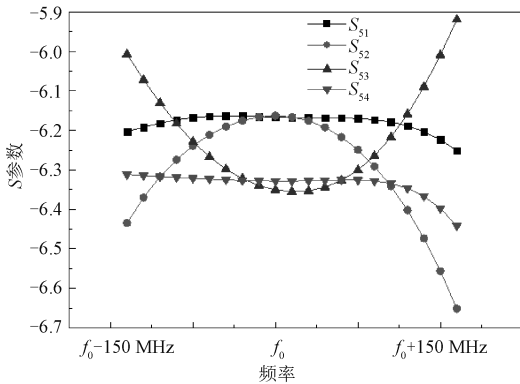


图 5 和差器 S 参数

3 仿真结果

基于图 6 所示天线仿真模型, 对天线 4 个端口的驻波系数进行仿真, 结果如图 7 所示。可以看出, 和差器的和差端口驻波系数都小于 1.5, 性能良好。

在中心频率处对天线方向图进行仿真, 结果如图 8 所示。可知, 天线的增益为 21.4 dB, 和差矛盾为 3.7 dB, 副瓣低于 -20 dB, 零深小于 -30 dB, 辐射效率为 85%。

按阵面电流等幅度分布和泰勒分布分别对天线方向图进行加权优化, 如图 9 所示。可以看出,

因为 E 面上的单元数比较少, 泰勒分布的副瓣比等幅分布低 1.4 dB, H 面上单元较多, 泰勒分布的副瓣比等幅度分布低 6.0 dB。

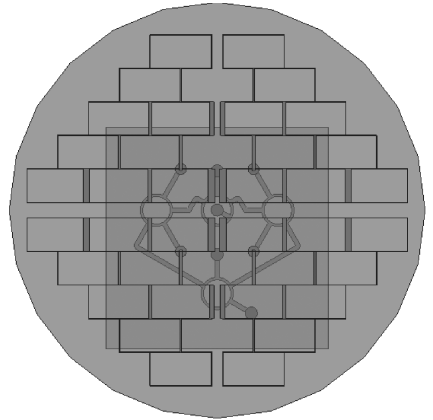


图 6 天线全阵面仿真模型

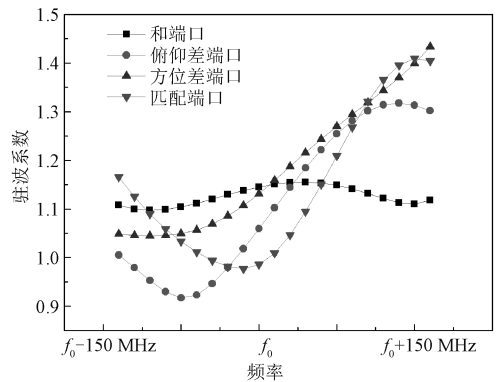


图 7 和差器驻波系数

4 结束语

本文提出了一种新型网格微带单脉冲天线设计方法, 该天线具有良好的单脉冲性能, 且相较于传统的单脉冲天线更易于设计和实现, 在导弹和卫星领域有较广阔的应用前景。但该天线也存在频带不易展宽的缺点。随着工作频率的提高, 寄生辐射能量变大, 因此该天线不适合在高频段应用。另外, 本文所提的网格微带阵列天线方向图综合方法还有许多待完善的地方。该天线方位面的副瓣优化比较理想, 但俯仰面的副瓣优化并不是太理想, 有可能是方位面的辐射单元错位排列引起的。同时, 在网格天线方向图的阵列综合时没有考虑互耦效应。在微带天线中, 互耦效应十分明显, 这直接导致天线需要在理论计算值上进

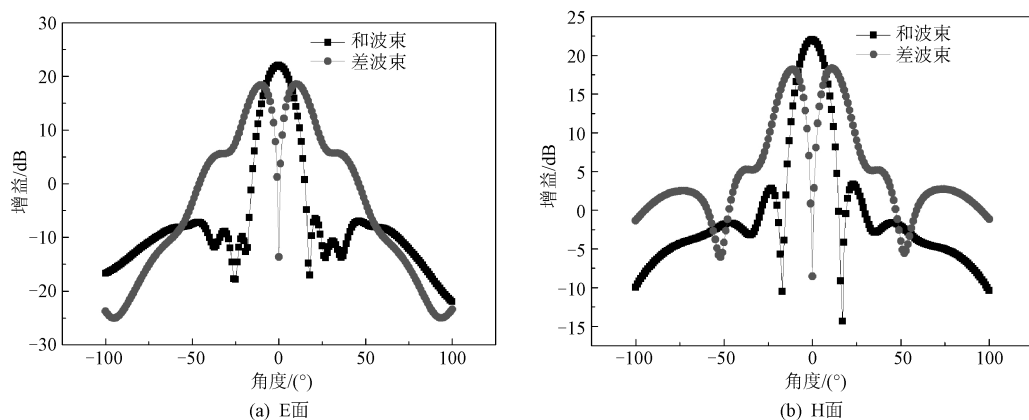


图8 天线和差波束方向图

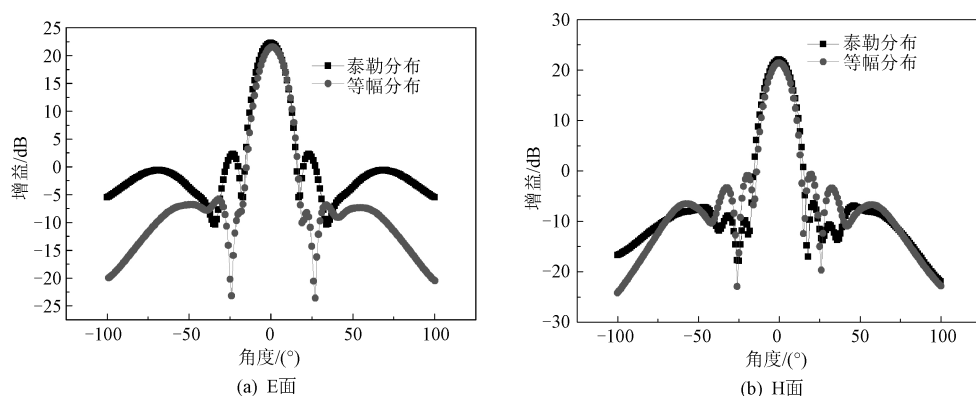


图9 不同算法加权优化后的天线方向图

行进一步优化。

参考文献

- [1] MILLIGAN T A. Modern antenna design[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] CHEN Z H, ZHANG Y P, BISOGNIN A, et al. An LTCC microstrip grid array antenna for 94 GHz applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1279-1281.
- [3] JEONG M G, AHN S H, KIM J H, et al. A grid-shaped microstrip traveling wave antenna with selective differential feeding networks for CM-level position detection systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, 2018, 66(7): 3487-3496.
- [4] RENGARAJAN S R, ZAWADZKI M S, HODGES R E. Waveguide-slot array antenna designs for low-average-sidelobe specifications[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2010, 52(6): 89-98.
- [5] 李旭平, 李斌, 张盛华, 等. 3 mm 平板波导缝隙阵列天线设计研究[J]. 微波学报, 2014, 30(2): 1-5.
- [6] 张立东, 张艳. 波导裂缝阵列天线可生产性研究[J]. 制导与引信, 2013, 33(1): 29-32.
- [7] 郑文超. 微带栅格阵列天线的方向图综合算法研究[D]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2010.
- [8] 薛轩. 石墨烯太赫兹天线与栅格型封装天线的设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [9] 张琳. 网格阵列天线的研究与设计[D]. 太原: 山西大学, 2011.