

DOI:10.16515/j.cnki.32-1722/n.2022.01.007

一种 C 波段雷达微带天线阵列的设计与实现

邓 宽, 张 玉

(金陵科技学院电子信息工程学院, 江苏 南京 211169)

摘 要:对 C 波段微带天线阵列在雷达方面的工程应用进行了理论和实验研究。首先根据经典理论设计微带天线阵列的基本制造因素;然后通过全波仿真软件对微带天线阵列进行数值模拟和优化,从而确定贴片单元和馈电网络的参数;最后制作了微带天线阵列实物,验证了设计方法的有效性。试验结果表明:制作的微带天线阵列测量结果与仿真结果基本吻合,满足工程要求,并获得了高达 27.24 dB 的天线增益。

关键词:C 波段;微带天线阵列;工程设计;贴片单元;馈电网络

中图分类号:TN98

文献标识码:A

文章编号:1672-755X(2022)01-0039-05

Design and Implementation of a C-band Radar Microstrip Antenna Array

DENG Kuan, ZHANG Yu

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: The engineering application of C-band microstrip antenna array in radar is studied theoretically and experimentally. First, basic manufacturing factors of microstrip antenna array are designed according to the classical theory. Then, the microstrip antenna array is simulated and optimized through full wave simulation software to determine the parameters of patch unit and feed network. Finally, the microstrip antenna array is fabricated to verify the effectiveness of the design method. The experimental results show that the measured results of the microstrip antenna array are basically agreement with the simulation results, meet the engineering requirements, and obtain an antenna gain of up to 27.24 dB.

Key words: C-band; microstrip antenna array; engineering design; patch unit; feed network

作为无线通信和雷达技术系统中的重要元件,天线的理论研究和工程设计引起了研究者的关注^[1-3]。微带天线具有体积小、重量轻、低轮廓、易于与其他微波电路集成等优点,在无线通信和雷达领域得到了广泛应用^[4-6]。文献[7]设计了一个微带天线阵列,用于雷达天线中的移动目标检测。文献[8]设计了用于战场监视的微带雷达天线阵列。文献[9]通过设计专门的耦合馈电网络和贴片辐射单元,得到 21 dB 增益和低旁瓣的收发天线阵列。文献[10]通过巧妙的辐射单元设计,获得了一种工作频段涵盖 C 波段和 X 波段的超宽带微带阵列。此外, Ma 等^[11]还提出了一种用于合成孔径雷达应用的双频和双极化微带天线。但由于材料选择、制造和实验产生的公差,微带天线阵列的实测增益通常远低于理论设计。

本文研究并设计了一种 C 波段平面微带天线阵列。首先,对 C 波段雷达微带天线阵列进行理论研究和模拟仿真,在此过程中,根据工程要求考虑一些基本的制造因素,包括介电基板的选择、辐射元件和馈电网络的设计等^[12-14];然后,在完成微带天线阵列的初始设计后,再将制造和测量过程中的一些不确定因素

收稿日期:2021-10-23

基金项目:金陵科技学院博士科研启动基金(jit-b-201423)

作者简介:邓宽(1979-),男,河南安阳人,副教授,博士,主要从事通信、嵌入式系统方面的研究。

进行优化;最后,通过理论与实验结果的对比,证明了本文所提出的微带天线阵列在雷达应用中的有效性,可以满足工程项目的要求。

1 微带天线阵列基本制造因素的设计

1.1 介电基板的选择

介电材料显著影响微带天线阵列的性能,因此,微带天线阵列的第一个设计步骤就是选择合适的介电基板,并满足电气和机械要求。在选择介电基板时,应考虑许多影响因素,例如介电常数与温度的相关性、损耗正切与频率的相关性、介质厚度的均匀性、介质的各向同性、热系数、温度、可加工性、湿度等^[15]。同时,其他一些物理性能,如耐腐蚀性、拉伸和结构强度、柔韧性、抗冲击性、可成形性等对介电基板的选择也有重要的影响^[1]。

1.2 辐射元件的设计

虽然微带贴片天线的形状可以任意设计,但矩形贴片仍然是微带天线阵列中最常用的基本形状。根据微带天线阵列的基本理论^[16],矩形贴片的初始尺寸(宽度 a 和长度 b)可以计算如下:

$$a = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad b = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta l \quad (1)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{a} \right)^{-1/2} \quad (2)$$

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

其中, c 是光速, f_r 是谐振频率, ϵ_r 是相对介电常数, h 是高度, Δl 是长度的变化值; ϵ_e 是等效介电常数。

公式(1)—公式(3)中使用的矩形贴片交叉极化模式为 TM_{m0} 。同时,当 $a/b = 1.5$ 时,微带贴片天线的交叉极化可以保持在 -20 dB 以下。

1.3 馈电网络的设计

馈电网络设计必须确保被激励的各贴片天线具有合适的幅度和相位。并联馈电网络的波束方向不依赖于频率;串联馈电网络的波束方向虽然比并联馈电网络更紧凑,但阻抗和波束方向的变化均较快^[1]。为了简化设计,本文使用了并联馈电网络的馈电方式。

微带贴片天线的馈电经常与辐射单元共形,因此微带贴片天线可以被视为微带线的延伸^[1]。图 1 的阵列结构可以激发出模式 TM_{01} ^[17],但其结构非常复杂,很容易产生寄生辐射和相互耦合。因此,本文使用了图 2 所示的另一种结构,这种结构不但可以激发出 TM_{10} 模式,而且在阻抗匹配方面具有更大的灵活性,无须改变馈线的长度。通过选择正确的参数 a 和 b ,微带贴片天线的交叉极化也可以保持在 -20 dB 以下。

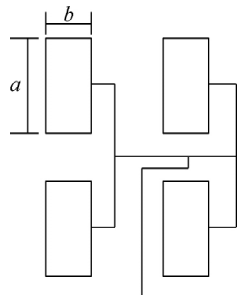


图 1 TM_{01} 模式和馈电网络的 2×2 子阵列配置

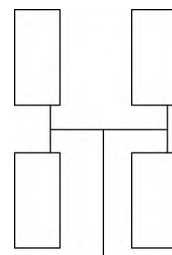


图 2 TM_{10} 模式和馈电网络的 2×2 子阵列配置

2 微带天线阵列仿真设计

表 1 列出了本文设计的微带天线阵列性能指标,其中设计的目标增益不能低于 25 dB。并联馈电矩

形贴片阵列的增益 G 可以近似表示为:

$$G = 10 \lg 4\pi L^2 - \alpha L - C_1 \tag{4}$$

其中, L 是馈电网络的波长数, α 是馈电损失的分贝数, C_1 是馈电不连续的损失。

通过公式(4)计算可以得出:1)选择由并联馈电网络的 16×4 均匀平面阵列能满足需求;2)微带天线阵列的辐射单元尺寸,即宽度 $a = 2.06$ cm,长度 $b = 1.63$ cm。

为进一步完善微带天线阵列的仿真设计,利用全波仿真软件来优化馈电结构参数,利用逐步阻抗匹配方法来提高微带天线阵列的带宽。图 3 和图 4 分别说明了 2×2 子阵列和 16×4 微带天线阵列的几何形状。

表 1 微带天线阵列的性能指标

项目	值
谐振频率	5.8 GHz
阻抗带宽(驻波比 ≤ 1.5)	$\geq 2\%$
阵列增益	≥ 25 dB
E 平面半波束宽度	$\leq 5^\circ$
H 平面半波束宽度	$\leq 18^\circ$
副瓣电平	≤ -13 dB

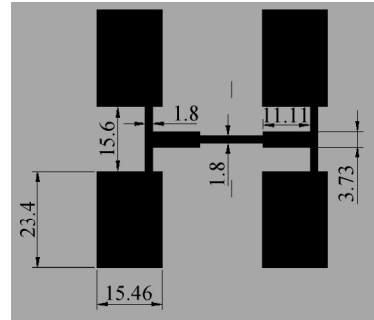


图 3 2×2 子阵列的几何形状(单位:mm)

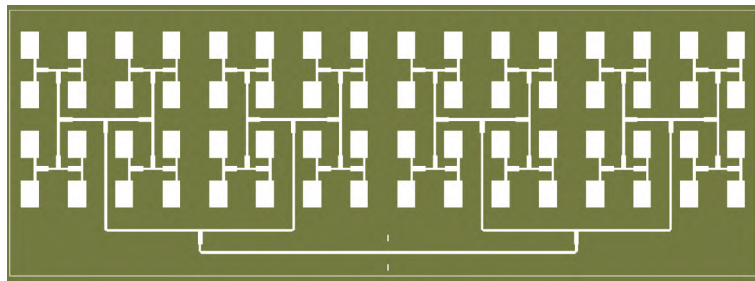


图 4 16×4 阵列的几何形状

在阻抗带宽约为 3.5%,驻波比(VSWR) < 1.5 ,阵列增益约为 26.5 dB 条件下,进行微带天线阵列的仿真设计,仿真结果如图 5—图 7 所示。由图 5 可知,3 种实验条件下,微带天线阵列的谐振频率均呈现 2 次峰值,当阵列覆盖天线罩后,微带天线阵列的谐振频率会略微降低^[18]。为了解决这个问题,使设计的谐振频率略高于预期频率,从而确定了增益、带宽和谐振频率合适的基板。由图 6、图 7 可知,没有天线罩时,3 种实验条件下,E 平面的半波束宽度约为 4° ,H 平面的半波束宽度约为 16° 。

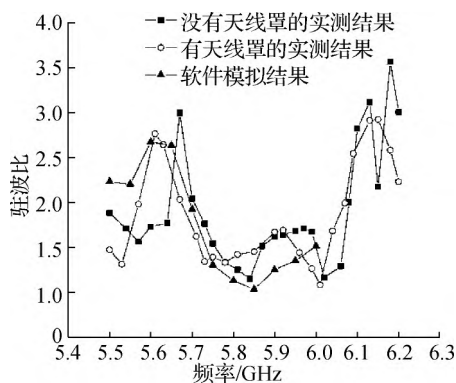


图 5 16×4 阵列的模拟和实测驻波比

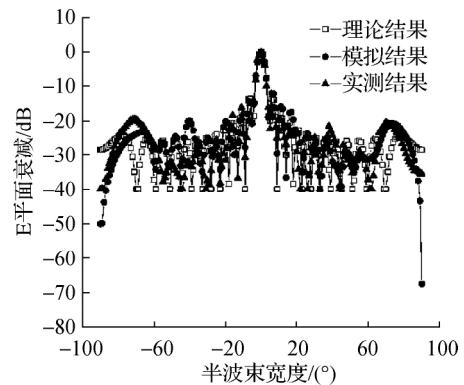


图 6 16×4 阵列的理论、模拟和实测 E 平面辐射方向图(没有天线罩)

3 样品制造及测试结果分析

除了缜密的仿真设计外,制造技术对于保证微带天线阵列的性能也非常重要。在制造过程中,每个环节都需要经过严格的控制,以实现更高的制造精度。

图 5—图 7 将加工原型的测量结果与仿真结果进行了比较。阻抗带宽在没有天线罩的情况下,仿真结果和测量结果之间的差异主要归因于制造精度。使用天线罩时,阻抗带宽会如预期的那样略微降低,最终,测试结果满足了实际工程的要求。图 6 和图 7 中的辐射结果在宽边方向上基本保持一致,但由于实际情况的非理想性,辐射结果在尾瓣处的差异变得较为明显。

图 8 和图 9 展示了微带天线阵列的 E 平面和 H 平面实测辐射方向图。从图 8 和图 9 可以看出,在谐振频率为 5.8 GHz 下,带有天线罩的微带天线阵列在 E 平面的半波束宽度为 4.05° ,H 平面的半波束宽度为 14.89° ,E 平面和 H 平面的旁瓣电平分别为 -14.05 dB 和 -13.69 dB,微带天线阵列最大增益为 27.24 dB,表明测量结果与表 1 中列出的性能要求之间具有良好的一致性。

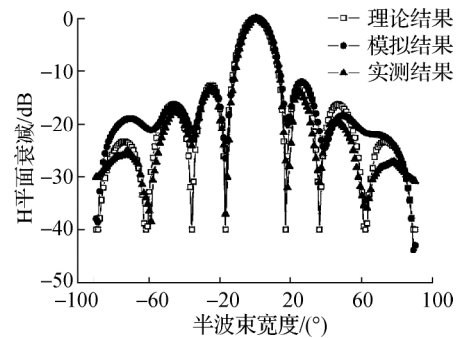


图 7 16×4 阵列的理论、模拟和实测 H 平面辐射方向图(没有天线罩)

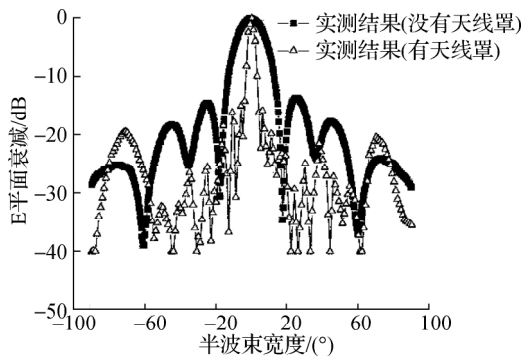


图 8 16×4 阵列的实测 E 平面辐射方向图

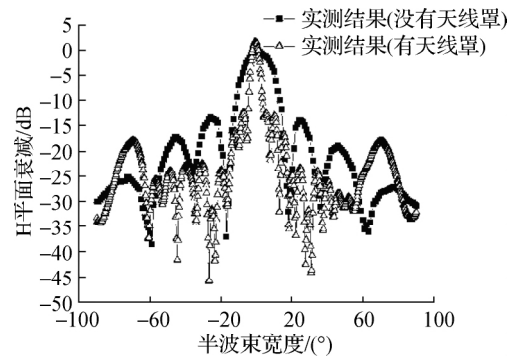


图 9 16×4 阵列的实测 H 平面辐射方向图

4 结 语

本文研究了 C 波段雷达微带天线阵列的一些设计策略和设计程序,研究结果表明制作的微带天线阵列测试结果与仿真结果基本吻合,所提出的微带天线阵列在雷达应用中的性能良好,能满足实际工程的要求,并获得了高达 27.24 dB 的天线增益。

参考文献:

- [1] JAMES J R, HALL P S. Handbook of microstrip antennas[M]. London: Peter Peregrinus, 1989
- [2] SONG C T P, HALL P S, GHAFOURI-SHIRAZ H D, et al. Packaging technique for gain enhancement of electrically small antenna designed on gallium arsenide[J]. Electronics Letters, 2002, 36(18): 234-241
- [3] CHI S Y, HWANG W. Gain enhancement method of microstrip antenna by dielectric cover, considering bandwidth[C]// Antenna & Propagation Society International Symposium. New York: IEEE, 2005: 67-82
- [4] LIN C S, ZHONG S S, SHI J H, et al. Gain enhancement technique for microstrip antennas[C]// Antenna & Propagation Society International Symposium. New York: IEEE, 2002: 119-127
- [5] CHAKRABARTI S. High gain planar microstrip antenna at X-band[C]// Applied Electromagnetics Conference. New York: IEEE, 2007: 346-357
- [6] KUO J S, HSIEH G B, LAI C A. Gain enhancement microstrip antenna with slots loaded in the ground plane[C]// An-

- tenna & Propagation Society International Symposium, New York;IEEE,2002:279—288
- [7] NISHIMURA S, NAKANO K, MAKIMOTO T. Franklin-type microstrip line antenna[C]//Antennas & Propagation Society International Symposium, New York;IEEE,1979:18—22
- [8] REVANKAR U K, BEENAMOLE K S. Low sidelobe light weight microstrip antenna array for battlefield surveillance radars[C]//Radar Conference, New York;IEEE,2003:442—453
- [9] CAO J, LIU Y Y, WANG Y J, et al. Design of a new microstrip antenna array with high gain and low side-lobe[C]//International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMWT), New York;IEEE,2018:56—68
- [10] ABOUENAGA T G, TAYEL M B, DESOUKY A F. High gain UWB four elements antenna array for C-band and X-band application[J]. Antennas and Propagation, 2020(8):19—29
- [11] MA X, WANG A. Dual-frequency and dual-polarization microstrip antenna for space-borne SAR application[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2002(4):1289—1296
- [12] XHVGAE S. Aperture field analysis of gain enhancement method for microstrip antennas[C]//International Conference on Antennas & Propagation, New York;IEEE,1997:147—159
- [13] RAHMAN A A, VERMA A K, OMAR A S. High gain microstrip antenna element and array on low and high permittivity substrate[C]//European Conference on Wireless Technology, New York;IEEE,2005:276—288
- [14] SELEZNYOV D G, REZNIK I I, SELEZNYOV A D. Rectangular patches microstrip antenna array optimization and characteristics analysis[C]//Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, New York;IEEE,2001:112—127
- [15] LEE R Q, ZIMMERMAN M, LEE K F. Enhancement of array gain with stacked parasitic elements[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium, New York;IEEE,1994:126—137
- [16] POZAR, SCHAUBERT D H. Microstrip antennas[M]. New York; Wiley-IEEE Press,1995
- [17] WALCHER D A, LEE R Q, LEE K. Microstrip patch antenna receiving array operating in the Ku band[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium, New York;IEEE,1996:355—367
- [18] SINGH P K, SAINI J. Effect of superstrate on a cylindrical microstrip antenna[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2018(6):785—788

(责任编辑:谭彩霞)

声 明

本刊已被中国知网、万方、维普、超星等数据库收录,如无特殊申明,即视为投稿者同意授权本刊及本刊合作媒体以数字化方式复制,并通过信息网络传播和发行。本刊支付的稿酬已包括上述所有使用方式的报酬。

作者向本刊提交文章发表的行为视为同意我刊上述声明。

本刊编辑部