

文章编号: 2096-1618(2022)04-0369-05

C波段高增益低副瓣微带阵列天线设计

余思豪, 姚振东, 张智强

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:在利用雷达进行目标探测时,通常需要雷达天线具有低副瓣特性以便在杂波和目标中进行精确识别,从而改善雷达探测强度,提高信号质量。针对此要求,提出工作于C波段可应用于多普勒天气雷达探测的高增益低副瓣阵列天线,该阵列天线由64个微带单元组成。微带天线单元采用开槽嵌入式结构馈电,同时改变嵌入深度对单元进行阻抗匹配。阵列使用并联的8组天线,每组天线串联4个1/4阻抗变换线实现阻抗匹配,调控天线单元的输入功率实现阵列的泰勒加权,从而有效地将天线方向图副瓣值降低。在微带阵列天线中心设计同轴馈电结构,并对整个阵列进行参数优化。仿真结果表明,该微带阵列天线在5.51~5.67 GHz的阻抗带宽范围内增益可达到21.2~22.3 dBi,副瓣电平大于25 dB,具有高增益、低副瓣的特点。

关键词:C波段;微带阵列天线;阻抗匹配;高增益;低副瓣

中图分类号:TN823+.27

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcui.2022.04.001

微带天线具有成本低、体积小和易加工等诸多优点,被广泛应用在雷达系统中^[1]。然而单个的微带天线方向性较差,增益较低,满足不了特定的工作要求。因此在设计中通常需要微带天线单元组阵,以期实现天线的较高性能^[2-3]。

在天气雷达系统中,天线的副瓣电平是一个关键的性能参数。如果天线方向图的副瓣电平较高,则会带来较大的杂波干扰,导致雷达很难区分目标回波。通常情况下,等幅、同相馈电的微带阵列天线可以得到较高的增益,但会加剧其副瓣电平的提高,达到-13.2 dB,这对于天气雷达等目标探测领域的应用是远远不够的^[4-6]。因此,研究具有低副瓣特性的微带阵列天线有着重要的工程价值。

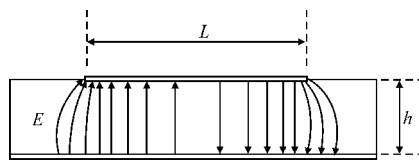
针对微带阵列天线低副瓣特性及其相关需求,开展串并混合式馈电的微带阵列天线的研究。馈电网络利用1/4阻抗变换线实现各天线单元上电流幅度的分布,通过控制微带传输线的长度来实现各单元电流相位的一致,完成一种C波段高增益低副瓣微带阵列天线的设计^[7-8]。此天线阵尺寸为280 mm×290 mm,总天线单元数为64,天线方向图的E面和H面均能够实现大于25 dB的副瓣电平,增益达到22.3 dBi。

1 微带天线基本原理

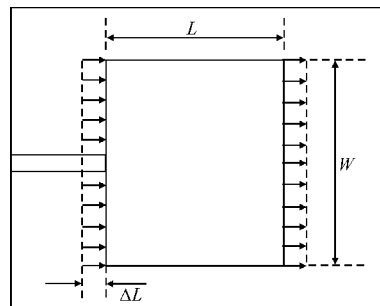
微带天线属于一种小尺寸的天线,通过在介质板上表面添加金属贴片,在下表面添加接地板组成。微带天线的辐射贴片与金属地板之间形成电磁场,其随

着贴片长度变化而改变,最终通过辐射贴片边缘处的等效缝隙向外辐射^[9]。

如图1所示,矩形微带贴片天线的长为 L ,宽为 W ,介质基板厚度为 h 。此微带天线可以等效成一段开路状态的微带传输线,根据传输线模型分析,只有沿着 L 方向场分布发生变化,场分布如图1(a)所示。可以看出,辐射贴片沿着长度 L 方向两侧的电场经分解后,其垂直于接地板方向上的电场分量方向相反,产生的辐射场相互抵消;其平行于传播方向的电场分量方向相同,产生的辐射场相互叠加^[10]。这样,就可以把矩形微带贴片天线等效成二元的缝隙天线阵,其相距为 L 、等效缝隙天线宽度为 ΔL 、长度为 W ,如图1(b)所示。因此,矩形微带贴片天线和与之等效的二元缝隙天线阵所产生的远区辐射场相同。



(a) 电场分布侧视图



(b) 电场分布俯视图

图1 微带天线辐射原理

收稿日期:2021-12-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42075001)

2 微带天线阵元设计

综合考虑微带天线的性能和成本,采用厚度为1.524 mm的Rogers RT/Duroid 4350B 聚四氟乙烯作为介质材料,相对介电常数为3.66,损耗角正切值为0.004,微带天线工作的中心频率取5.6 GHz。

2.1 阵元参数设计

根据天线的工作频率 f 、介质基板的介电常数 ϵ_r 和厚度 h ,采用传输线模型计算矩形微带贴片天线的尺寸^[11]:

$$W = \frac{c}{2f} \times \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, W 为微带天线的辐射贴片宽度, c 为光速。

理论上,辐射贴片长度约等于半个波导波长,实际中,由于边缘效应的影响,辐射贴片的长度会略微缩短^[12]:

$$L = \frac{\lambda_g}{2} - 2\Delta L \quad (2)$$

式中, L 为微带天线的辐射贴片长度, λ_g 为导波波长, ΔL 为微带线等效缝隙长度。

$$\lambda_g = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_e}} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0.412h \times \frac{(\epsilon_e + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (4)$$

式中, ϵ_e 为微带天线的等效介电常数,最终计算出贴片天线阵元尺寸 $W=19.1$ mm, $L=12.7$ mm。

2.2 阵元馈电方式的选择

微带天线的馈电方式多种多样,常见的有同轴馈电、微带线馈电、耦合馈电和共面波导馈电等^[13]。其中,微带线馈电是最容易实现加工难度小的方式。综合考虑多种因素,在微带线馈电方式的基础上,将辐射贴片进行开槽处理,微带馈线延伸进天线内部,如图2所示。

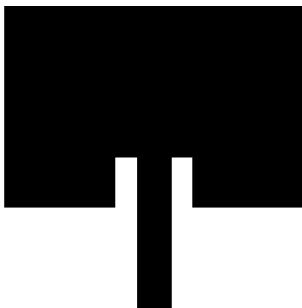


图2 开槽嵌入式馈电微带天线

矩形微带贴片天线的输入阻抗通常达到200 Ω 以上,在馈线与天线之间需进行阻抗匹配,从而增大馈电网络尺寸和提高复杂度。因此,使用开槽嵌入式馈电结构的微带天线,通过调节开槽的尺寸和馈线插入深度,以此改变微带贴片天线的输入阻抗,实现阻抗匹配,有效地简化了馈电网络结构。

2.3 阵元仿真分析

HFSS 是一款基于有限元法的电磁仿真软件,使用HFSS 对此微带天线单元进行仿真分析,经过反复优化后得到 S_{11} (反射系数),如图3所示。能够看出天线在5.6 GHz的频率附近谐振,此时的 S_{11} 最小,约为-40.9 dB;天线的 E 面和 H 面的辐射方向如图4所示,最大增益约为7.2 dBi。

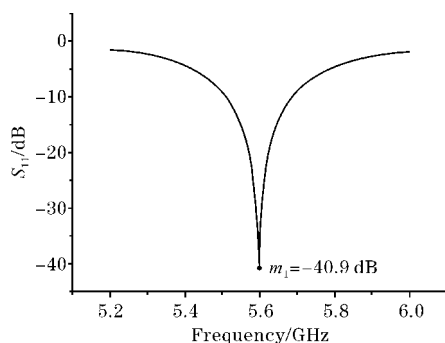


图3 微带天线单元的 S_{11}

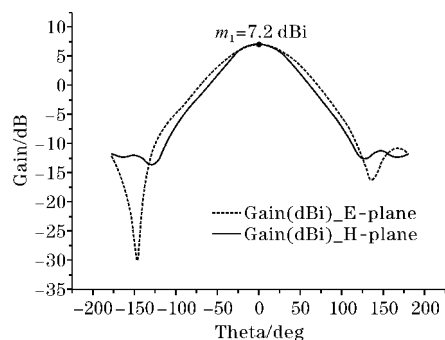
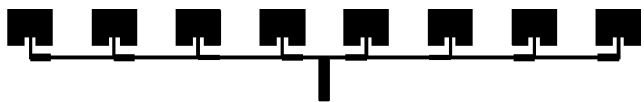


图4 微带天线单元的辐射方向图

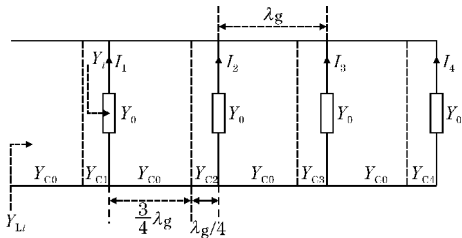
3 馈电网络设计

微带阵列天线的馈电网络大体分为并联、串联和串并混合等馈电方式,为了更容易控制阵元之间的电流比值且降低馈电网络复杂度,此馈电网络采用串并混合的方式,通过在两个天线阵元之间串联四分之一波长阻抗变换段,最后再调整阻抗变换段与主馈线之间的特性阻抗值之比,就能实现各单元电流的不等幅分布^[14]。串并混合式馈电线阵的结构形式如图5(a)所示,其等效微波电路形式如图5(b)所示。在此馈电网络结构中,天线单元之间的电流采用泰勒分布进行激励,从而降低天线副瓣电平,这样不仅能够灵活控制

主馈线的宽度,解决微带线功率容量不足的问题,而且更能简便、快捷地控制各天线单元的电流幅度分布。



(a) 串并结合式馈电线阵形式



(b) 线阵等效电路

图 5 微带线阵馈电网络及等效电路

图 5(b) 中,阵元的等效导纳为 Y_0 ,贴片上的电流为 $I_i, i=1,2,3,4$ 。为确保阵元之间馈电的相位一致,两个相邻阵元的距离设定在一个波导波长 λ_g ,靠近第 i 个阵元的阻抗变换段的特征导纳为 Y_{ci} ,其长度为 $\lambda_g/4$;剩余的 $3/4 \lambda_g$ 为主传输线,特性导纳为 Y_{c0} 。从第 i 端馈线向阵列末端看进去的输入导纳为 Y_{Li} ,从第 i 个阵元端向末端看进去的输入导纳则是 Y_i ,可计算得到:

$$Y_i = Y_0 + Y_{L(i+1)} \quad (5)$$

$$Y_{L(i+1)} = \frac{Y_{c0}^2}{Y_{C(i+1)}} Y_{(i+1)} = n_i^2 Y_{(i+1)} \quad (6)$$

$$n_i = \frac{Y_{c0}}{Y_{C(i+1)}} \quad (7)$$

...

$$Y_1 = Y_0 + n_1^2 Y_2 = Y_0 + n_1^2 (Y_0 + n_2^2 Y_3) = \dots = Y_0 (1 + n_1^2 + n_1^2 n_2^2 + \dots + n_1^2 n_2^2 \dots n_{i-1}^2) \quad (8)$$

由式(8)可得,比值 n_i 决定了第 $i+1$ 个贴片的激励电流,其对应关系为:

$$I_1 : I_2 : \dots : I_i = n_1 : n_2 : \dots : n_i \quad (9)$$

同时,天线副瓣值以 -30 dB 的指标设计,按照泰勒综合法计算出 8 元线阵的电流分布,求得一侧的电流分布。同理,根据对称关系,线阵另一侧的电流幅度分布也可以求得,最终再通过电流幅度分布结合式(7)和式(9),计算出对应的四分之一波长阻抗变换器阻抗值,进而计算其线宽,如表 1 所示。

表 1 贴片单元与阻抗变换器阻抗值及线宽对应关系

归一化电流幅度	特性阻值/ Ω	线宽/mm
1	70.08	1.83
0.8187	81.87	1.32
0.5287	64.58	2.14
0.2906	54.97	2.86

4 微带天线阵列设计

4.1 阵列中心同轴馈电

完成单排线阵仿真设计后,将此单排线阵当成一个独立阵元,进而组成一个 8×8 矩形微带天线阵,如图 6 所示。最后,在阵列中心位置做一个同轴馈电结构,同轴内导体半径 $R_1 = 0.6$ mm,外导体半径 $R_2 = 2$ mm,内外导体中间填充聚四氟乙烯作为介质。同轴馈电结构和仿真结果分别如图 7 和图 8 所示,可以看出此同轴馈电结构在 $1 \sim 10$ GHz 的频带内 S_{11} 均小于 -15 dB,有较宽的工作频带,能够满足此天线阵馈电的需求。

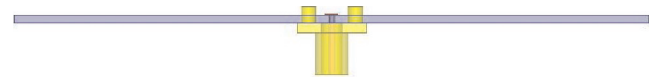


图 6 中心同轴馈电结构

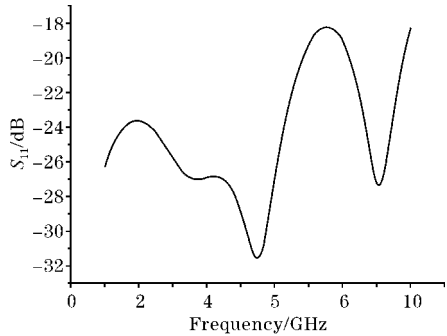


图 7 中心同轴馈电结构的 S_{11}

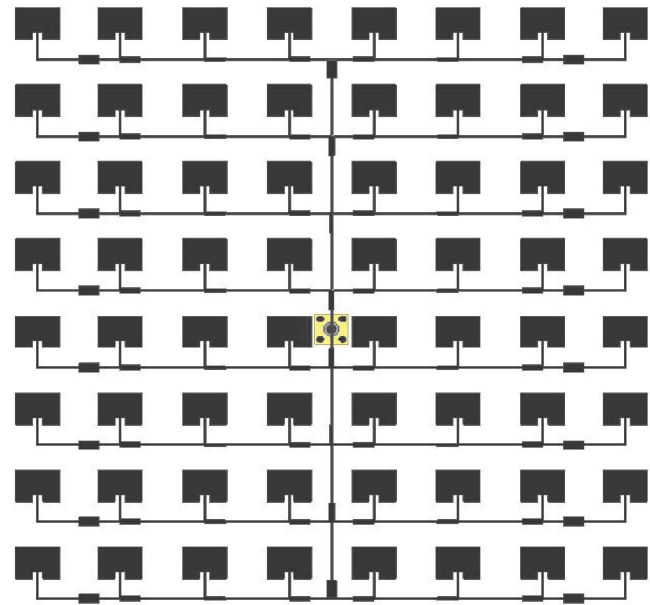


图 8 矩形微带阵列天线结构

4.2 天线阵列优化仿真

继续使用 HFSS 将此完整的微带阵列天线进行参数调整和仿真优化,得到天线的 S_{11} 和方向图特性,分别如图 9 和图 10 所示。仿真结果显示,此微带阵列天线

各性能参数均良好,在5.6 GHz处 S_{11} 约为-21.6 dB,即驻波比约为1.17,阻抗带宽约200 MHz,且增益能达到22.3 dBi,方向图 E 面和 H 面副瓣电平值分别为-27.5 dB和-25.4 dB。此微带阵列天线在满足各项基础指标上,最大程度实现了高增益、低副瓣的需求。矩形微带阵列天线3D方向图见图11。

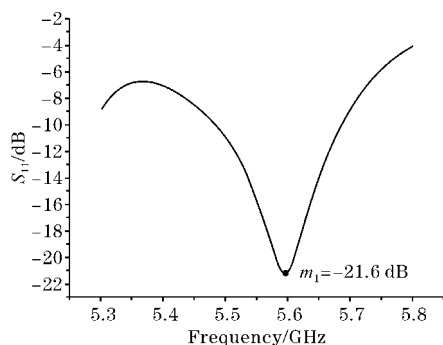
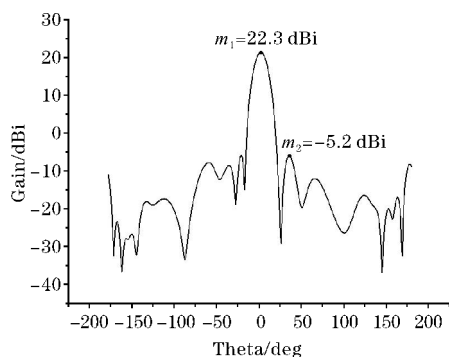
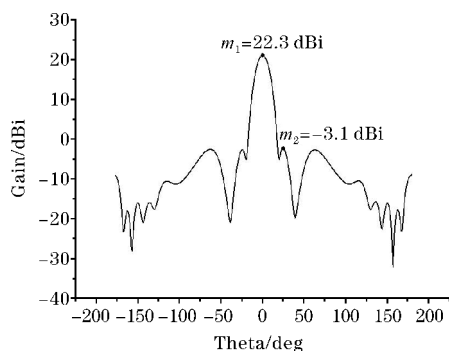


图9 微带天线阵列 S_{11}



(a) E 面方向图



(b) H 面方向图

图10 微带天线阵列方向图

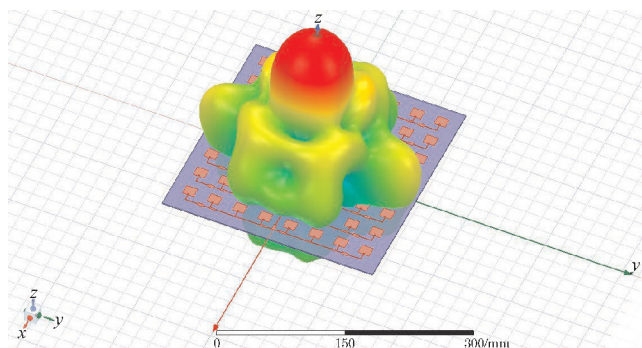


图11 矩形微带阵列天线3D方向图

4.3 天线阵列口径效率

天线的口径效率定义为接收天线的有效口径 A_e 和物理口径 A_p 的比值,可以表示为

$$\varepsilon_{ep} = \frac{A_e}{A_p} \quad (10)$$

其中

$$A_e = \frac{G \cdot \lambda^2}{4\pi} \quad (11)$$

式中, G 是天线阵列的总体增益, λ 是中心频率工作波长。

由于此天线阵采用电流锥削的方式来降低方向图副瓣值,导致口径效率降低,最终得到 $\varepsilon_{ep} = 62.8\%$ 。

5 结束语

设计了一款结构紧凑的C波段微带阵列天线,物理尺寸为280 mm×290 mm,并对插入式馈电微带天线单元、串并式馈电网络以及中心同轴馈电结构等进行仿真和分析,得到比较理想的仿真结果,在5.6 GHz频点处增益达到22.3 dBi,副瓣电平达到25 dB,口径效率达到62.8%。该天线具有高增益、低副瓣、低剖面及小型化等特点,各项指标均达到了预期要求,符合多普勒天气雷达高增益低副瓣天线的要求,为接下来的实物测试及分析提供了理论支撑。

参考文献:

- [1] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [2] 卢宇锋, 祖浩然, 薛静怡, 等. X波段高增益低副瓣多层微带阵列天线[A]. 中国电子学会. 2020年全国微波毫米波会议论文集(下册)[C]. 中国电子学会: 中国电子学会微波分会, 2020: 3.
- [3] Constantine A. Balanis. Antenna Theory Analysis and Design [M]. 3rd edition. New York: John Wiley, 2005: 811-876.
- [4] 傅亦源, 柴舜连, 毛钧杰. 低副瓣串馈微带天线阵设计[J]. 舰船电子工程, 2004(2): 77-80.
- [5] 赵伟, 段磊, 元东, 等. 一种毫米波低副瓣微带天线阵列的设计与仿真[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(2): 161-163.
- [6] Nivetha K, Monica A. Microstrip Patch Array Antenna for X-Band Applications [J]. International Journal of Engineering & Technical Research, 2015, 4(3).
- [7] ZHANG Z X, CHENG H F, ZHANG L, et al. A 24×24 Microstrip Array Antenna at K-band [J]. The

- Open Electrical & Electronic Engineering Journal, 2015,9(1).
- [8] 左建康,耿彦峰. C波段低副瓣定向微带阵列天线的设计[J/OL]. 山西大学学报(自然科学版), <https://doi.org/10.13451/j.sxu.ns.2021089>, 2021-09-29.
- [9] SudhamanK, GodhavariT, Anusha R. Design of Microstrip Patch Antenna at 10.3 GHz for X-Band Applications[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020,993(1).
- [10] 郭婧. K波段微带阵列天线技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- [11] 李明洋, 刘敏. HFSS 天线设计[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [12] Venkateshkumar Udayamoorthy, MegaV, RakhanaP, et al. A Rectangular Microstrip Patch Antenna for Ultra-Wide Band Application Using HFSS Software[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021,1916(1).
- [13] 朱彦军, 杨硕. 一种C波段的矩形微带天线设计[J]. 通信技术, 2018,51(10):2516-2520.
- [14] 戴欣华, 姚金杰, 苏新彦, 等. Ku波段低副瓣高增益微带阵列天线设计[J]. 传感器与微系统, 2020,39(12):78-80.

C-band High Gain Low Sidelobe Microstrip Array Antenna Design

YU Sihao, YAO Zhendong, ZHANG Zhiqiang

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: When radar is used for target detection, Radar antennas are usually required to have low sidelobe characteristics for accurate recognition in clutter and targets, so as to improve radar detection intensity and signal quality. To meet this requirement, a high gain and low sidelobe microstrip array antenna, which can be applied to Doppler weather radar detection in C-band, is proposed in this paper. The array antenna consists of 64 elements. Firstly, the antenna element is fed by slotted embedded structure, and the impedance matching of the element is carried out by changing the embedding depth. Then, the array uses 8 antennas in parallel, and each antenna has four 1/4 impedance transform lines in series to achieve impedance matching. By adjusting the input power of each element to achieve the Taylor weighting of the array, the sidelobe value of the antenna pattern can be effectively reduced. Finally, a coaxial feed structure is designed in the center of the microstrip array antenna, and the parameters of the whole array are optimized. Simulation results show that the gain of the microstrip array antenna can reach 21.2 to 22.3 dBi in the impedance bandwidth range of 5.51-5.67 GHz. And the sidelobe level of the antenna is greater than 25 dB. So it has the characteristics of high gain and low side lobe.

Keywords: C-band; microstrip array antenna; impedance matching; high gain; low sidelobe