

DOI: 10.11991/yykj.202003010

一种 C 波段基于发卡结构的低耦合贴片天线

王文君, 刘长军

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘 要:在收发天线对中, 收发天线单元间的距离越近, 单元间的耦合越强。为了抑制近距离放置的 2 个微带贴片天线单元间的互耦, 提出一种占用很小平面空间的对称发卡结构, 通过引入新的耦合路径进行天线耦合补偿。基于该结构, 设计加工了工作频率在 5.8 GHz 的微带贴片天线对, 尺寸为 30 mm×50 mm×1 mm。天线单元边缘间距为 $0.03\lambda_0$ 。实验测量结果表明, 采用该结构能够使天线对在 5.8 GHz 实现 42 dB 隔离度, $|S_{11}| < -10$ dB 带宽为 1.21%, 带宽内隔离度大于 40 dB, 证明了该设计的有效性。

关键词:发卡结构; 互耦抑制; 微带天线; 隔离度; 阵列天线;

中图分类号: TN821

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2021)01-0071-05

Mutual coupling reduction by using a hairpin based structure for a C band patch antenna pair

WANG Wenjun, LIU Changjun

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: In T/R antennas, closely placed antennas always lead to high mutual coupling. In order to restrain the mutual coupling between two closely placed microstrip patch antennas, a vertical wall using compact hairpin structure is proposed, which introduces a new coupling path as coupling compensation. The 30mm×50mm×1mm patch antenna pairs are designed, which work at 5.8 GHz, and the edge-to-edge distance is $0.03\lambda_0$. λ_0 is the wavelength in free space. The experimental results verify that the antenna pair can achieve 42 dB isolation at 5.8 GHz, the bandwidth of $|S_{11}| < -10$ dB is 1.21%, and the isolation within the bandwidth is more than 40 dB, which proves effectiveness of the design.

Keywords: hairpin structure; mutual coupling suppression; microstrip antenna; isolation; impedance; array antenna

随着天线集成化的发展, 要求阵列天线有高增益且满足小型化, 集约型的阵列天线被广泛应用^[1]。天线单元间的互耦效应是阵列天线固有的重要特征之一, 随着天线阵阵元之间的距离减小, 互耦影响就会加剧, 并影响天线阵的辐射性能^[2]。在 T/R 组件的收发天线对中, 为了保持收发天线的方向一致, 收发天线的间隔很小, 对降低互耦提出了很高要求。

目前, 已经提出一些具有耦合抑制的解决方案。例如, 文献 [2-6] 使用缺陷地结构, 通过在微带天线的接地金属板上蚀刻出不同的缺陷形状来抑制耦合。这种方法可能会增加天线的后向辐

射, 导致天线的前后比下降。文献 [7-9] 使用电磁带隙结构, 文献 [10-13] 在单元间设计如 U 型或曲折线等不同形状的谐振结构等。这些结构需要在单元间保留较大的空间, 不适用于近距离贴片单元间的耦合抑制。文献 [14] 使用地面开缝与在墙上添加不同的光子带隙 (photonic band gap, PBG) 结构组合的形式来达到有效的耦合抑制。文献 [15] 使用不同形状的辐射贴片来提高耦合抑制。

本文提出了一种“墙”的结构, 将“墙”垂直插入 2 个贴片单元中间, 并在“墙”的介质基板两侧蚀刻出发卡结构。通过引入额外的耦合路径, 从而有效地抵消 2 个单元间的原有耦合, 并且只占用很小的平面空间, 非常适合于小间距的天线应用。

1 耦合抑制结构设计

通过在 2 个近距离放置的侧馈微带贴片单元之间加入特定的结构, 可以在贴片单元之间引入

收稿日期: 2020-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61931009).

作者简介: 王文君, 女, 硕士研究生;
刘长军, 男, 教授, 博士。

通信作者: 刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

新的耦合路径。经过优化设计,可以抵消天线单元间的原有耦合,实现降低天线耦合的目的。

1.1 天线对设计

通过 2 个常规的侧馈的微带贴片天线实现一收一发的功能。天线中心频率为 5.8 GHz, 天线边缘间距为 1.56 mm ($0.03\lambda_0$)。天线中心间距为 $0.41\lambda_0$ 。该天线采用 F4B 介质基板进行加工, 介质基板的相对介电常数为 2.65, 厚度为 1 mm。按照常规贴片天线进行设计, 天线的结构如图 1 所示。贴片天线的等效长度为 $L+2\Delta L$ 。 ΔL 为^[16]

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon^{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon^{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (1)$$

式中: h 为介质基板厚度; ϵ^{eff} 为等效相对介电常数。

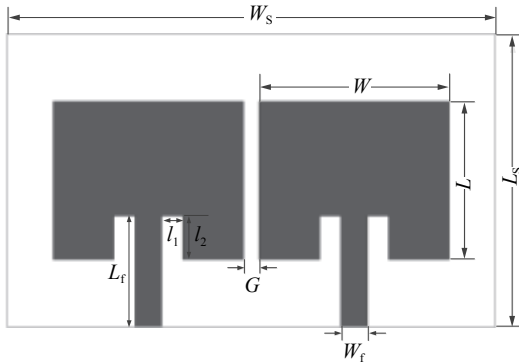


图1 微带天线

根据式 (1) 得到天线设计基本尺寸 L_s 、 W_s 、 L 、 W 、 L_f 、 W_f 、 G 、 l_1 和 l_2 分别为 30.0、50.0、6.2、19.5、11.4、2.7、1.56、2.2 和 4.5。天线的 -10 dB 带宽为 5.71~5.86 GHz。由于天线距离很近, 在带宽内 $|S_{21}|$ 大于 -8.1 dB。在 5.8 GHz, $|S_{21}|$ 仅为 -7.2 dB。天线增益为 5.5 dB。

1.2 耦合抑制结构设计

散射矩阵法是一种较为简单直接地分析天线单元间耦合强弱的方法。通常采用 S_{mn} 的值描述阵列中第 m 、 n 个单元间的耦合强弱。

2 个贴片天线之间的耦合近似为^[17]

$$S_{21} \approx \frac{2Z_{21}Z_0}{(Z_{11} + Z_0)^2 - (Z_{21})^2} \quad (2)$$

式中: Z_{21} 为天线两端口之间的转移阻抗; Z_{11} 为一个天线端口的输入阻抗; Z_0 为系统阻抗。当天线输入阻抗匹配时, 减小 $|Z_{21}|$ 是减小天线耦合的有效方法。

根据式 (2), 借鉴发卡滤波器中的“发卡”结构, 在天线间引入一个谐振在天线中心频率的耦合通道。通过优化设计发卡的长度, 抵消天线原来的耦合, 减小 $|Z_{21}|$, 实现高隔离度的天线对。

发卡结构的设计如下:

- 1) 采用双发卡结构如图 2 所示, 调节发卡的长度, 使得发卡的谐振频率为天线的中心频率 f_0 ;

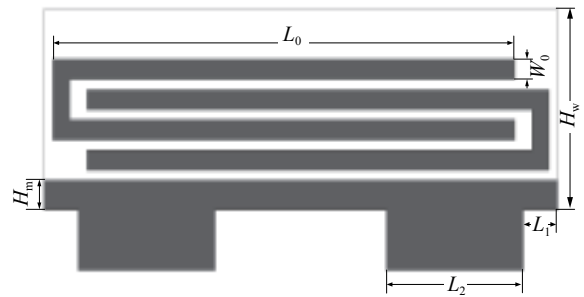


图2 发卡结构的设计

- 2) 将发卡结构引入到天线缝隙的中间, 调节贴片天线的尺寸, 使天线工作在中心频率 f_0 ;
- 3) 优化发卡的长度和对地间距, 提高天线在中心频率的隔离度。
- 4) 检验天线的中心频率和方向图。如果不满足要求, 就重复步骤 2)。

如图 2 所示在天线辐射单元间加入刻蚀发卡形状的“墙”结构。该结构同样采用 F4B 介质基板制作, 厚度为 0.8 mm。“墙”垂直插入 2 个贴片单元中间, 引入了额外的耦合路径, 产生一个耦合通带, 从而抵消了 2 个单元间原有的直接耦合。相比传统方法中在 2 个单元中间加入不同的平面结构, 该结构只占用了很小的天线电路板面积。其中, 发卡结构的长度大约等于一个工作波长。发卡结构的基本参数 L_0 、 W_0 、 H_w 、 H_m 、 L_1 和 L_2 分别为 27.0、1.0、10.0、1.5、2.0 和 8.0。

发卡结构的长度 L_0 的变化会影响天线的隔离度。天线最高隔离度对应频率随天线长度 L_0 的变化如图 3 所示。 L_0 增大, 最高隔离度对应频率向低频偏移; 反之则向高频偏移。该结构可以有效地抑制天线单元间的耦合, 但天线的方向图主瓣方向会发生偏移, 增益降低。

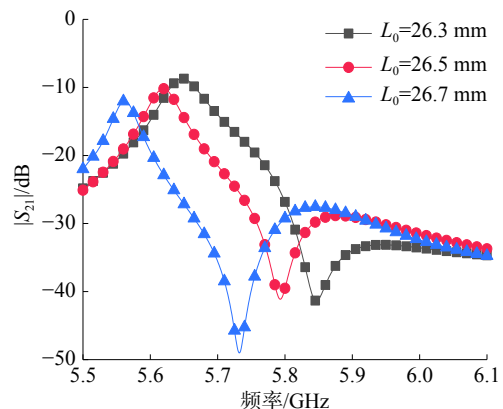


图3 不同长度发卡结构对天线耦合的影响

天线方向图如图4所示。在天线单元中插入该结构会略微影响贴片天线的谐振频率,可以通过调整贴片的尺寸来进行补偿。为了改善天线的方向图,在“墙”的底部增加接地的金属带,并调整了发卡结构的间距。天线的方向图和隔离度效果均有了很大的改善。

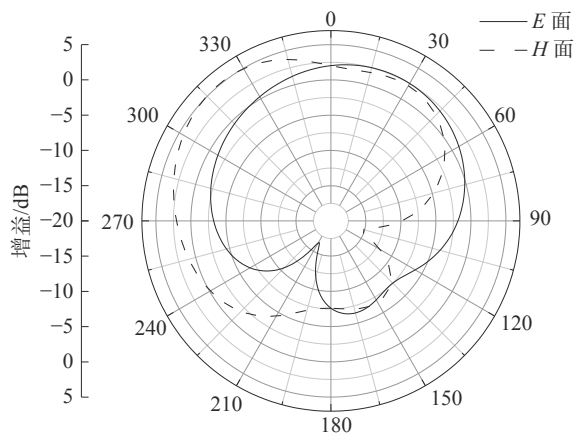


图4 低耦合天线的方向图

图5给出了采用相同尺寸的贴片天线单元的条件下,添加不同去耦合结构与不添加去耦合结构情况下的仿真 $|S_{21}|$ 曲线对比图。结果表明,若将“墙”的两面全部覆盖金属,在5.8 GHz天线的 $|S_{21}|$ 降低到-28.3 dB,相较于不添加去耦合结构, $|S_{21}|$ 减小了大约11 dB,而采用发卡结构能够在5.8 GHz将 $|S_{21}|$ 降低到-40 dB以下。此外,加入接地金属带后,天线在保证只加入发卡结构能实现的耦合抑制效果的同时,天线的方向图也有了很大的改善。

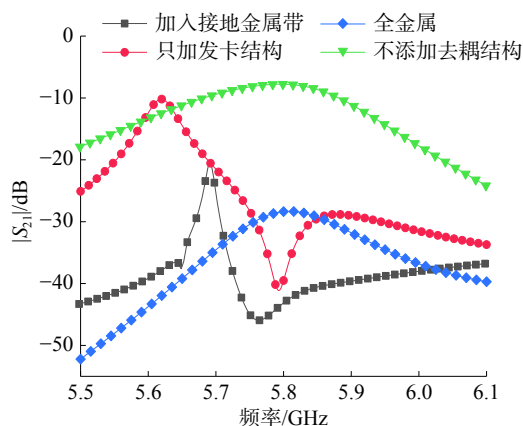
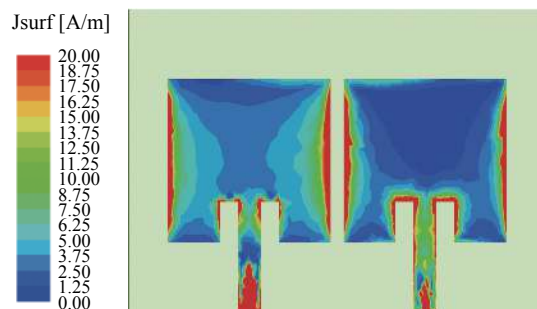
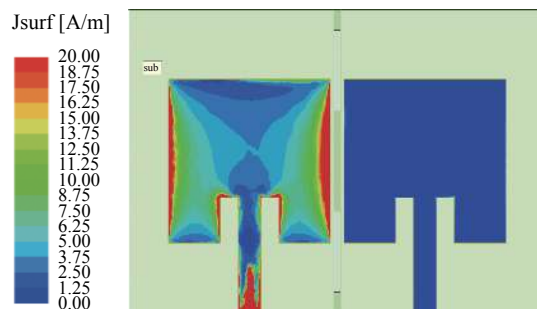
图5 使用不同结构天线的 $|S_{21}|$ 对比

图6给出了添加去耦合结构前后贴片天线上的表面电流分布。左侧端口馈电时,在添加去耦合结构前,右侧贴片上有很强的耦合电流,但在引入去耦合结构后,右侧贴片上的耦合电流明显减少。



(a) 未添加去耦合结构



(b) 添加去耦合结构

图6 贴片天线上的表面电流

2 测量结果与分析

2.1 测试系统

采用安捷伦公司的N5230A型号矢量网络分析仪测量天线的 S 参数。采用17.16 dB标准增益喇叭天线对天线的增益进行测试。图7给出了贴片天线和去耦合结构的加工实物图。图8给出了低耦合天线的测试系统。

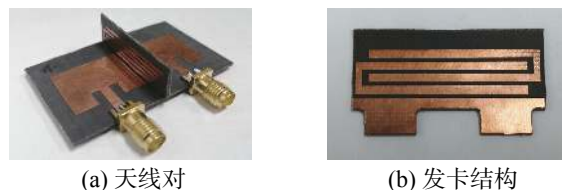


图7 天线加工实物



图8 低耦合天线测试系统

2.2 测试结果

仿真与实验测试 S 参数的对比结果如图9所示。

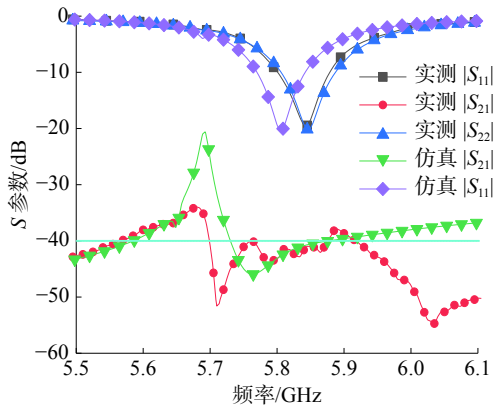


图9 仿真与测试结果对比

加工天线的测试频率相较于仿真结果存在一定的偏移,是加工天线的介质基板的介电常数和厚度与仿真模型设置的基板参数存在一定偏差的缘故。测试结果表明,在所设计的-10 dB带宽内,天线单元间能达到40 dB的隔离度,符合设计的要求。

图10给出了天线的仿真和测试方向图对比,测试结果与仿真结果较为吻合。

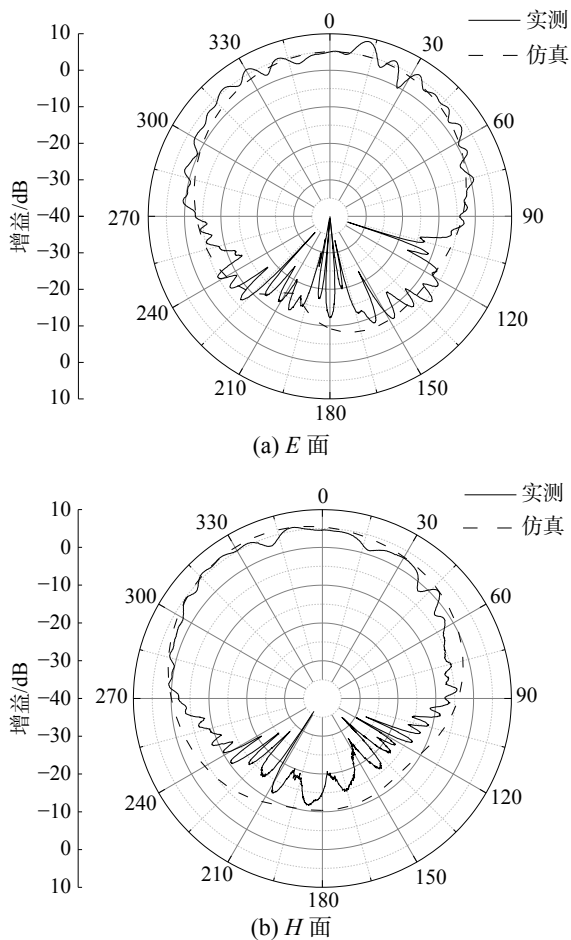


图10 仿真与测试方向图对比

表1展示了采用不同的耦合抑制结构设计的贴片天线单元间距与耦合抑制效果对比。从表中

可以看出,与本文采用结构相比,文献[3]贴片单元间距接近,但无后向辐射增加,且-10 dB带宽内耦合抑制提高了25%;文献[7-15]所采用的去耦结构均不引入额外的后向辐射,文献[7]和文献[11]中贴片单元间距增加了4倍,耦合抑制效果分别低于本文设计结构38.5%和60%;文献[8]中单元间距为本文的9倍,但耦合抑制效果低47.5%;文献[15]中的单元间距略小于本文结构,但耦合抑制效果低72.5%。

表1 不同耦合抑制结构对比

结构对比	单元间距	带内耦合抑制/dB	增加后向辐射
文献[3]	$0.031\lambda_0$	30	有
文献[7]	$0.13\lambda_0$	24.6	无
文献[8]	$0.28\lambda_0$	21	无
文献[11]	$0.11\lambda_0$	16	无
文献[15]	$0.026\lambda_0$	11	无
本文设计	$0.03\lambda_0$	40	无

3 结论

本文通过采用发卡形结构,设计了一种能实现近距离微带天线单元间互耦抑制的结构,天线的仿真与实测结果相吻合。1)去耦合结构以牺牲微带天线的低剖面的特性换取高效的耦合抑制效果。2)为在需要近距离布局天线单元且对天线的剖面要求较低的情况下,实现了42 dB的高隔离度,提供了新的天线设计思路。3)去耦合结构没有增加天线的面积,也没有引入增加额外的后向辐射,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 付树洪,童创明,李西敏,等.一种新颖的小型宽阻带电磁带隙结构[C]//中国电子学会.2009年全国天线年会论文集(上).中国电子学会:中国电子学会天线分会,2009:4.
- [2] 王矗,杨莘元,冯春楠,等.互耦对阵列天线辐射特性的影响[J].应用科技,2008,35(10):1-4.
- [3] OUYANG J, YANG F, WANG Z M. Reducing mutual coupling of closely spaced microstrip MIMO antennas for WLAN application[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2011, 10: 310-313.
- [4] GAO D, DI F, FU S, et al. A Defected Ground Structure (DGS) for Reducing the Mutual Coupling of Dual Polarized Microstrip Antennas[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Chengdu, China, 2018: 1-3.
- [5] 李文兴,刘聪,赵中洋.X波段Vivaldi天线阵列互耦研究[J].应用科技,2012,39(3):32-35.

- [6] YOON Y, HWANGBO S, YANG H Y. Point Symmetric Complementary Meander Line Slots for Mutual Coupling Reduction [P]. USA: 2019-10-31.
- [7] YANG F, RAHMAT-SAMII Y. Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: A low mutual coupling design for array applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2003, 51(10): 2936–2946.
- [8] FARAHANI H S, VEYSI M, KAMYAB M, et al. Mutual coupling reduction in patch antenna arrays using a UC-EBG superstrate[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2010, 9: 57–59.
- [9] PRABHU P, MALARVIZHI S. Novel Double-side EBG based mutual coupling reduction for compact quad port UWB MIMO antenna[J]. *AEU-international journal of electronics and communications*, 2019, 109: 146–156.
- [10] FARSI S, ALIAKBARIAN H, SCHREURS D, et al. Mutual coupling reduction between planar antennas by using a simple microstrip U-section[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2012, 11: 1501–1503.
- [11] ALSATH M G N, KANAGASABAI M, BALASUBRAMANIAN B. Implementation of slotted meander-line resonators for isolation enhancement in microstrip patch antenna arrays[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2013, 12: 15–18.
- [12] HABASHI A, NOURINIA J, GHOBADI C. Mutual coupling reduction between very closely spaced patch antennas using low-profile folded split-ring resonators (FSRRs)[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2011, 10: 862–865.
- [13] HAJILOU Y, HASSANI H R, RAHMATI B. Mutual coupling reduction between microstrip patch antennas[C]//Proceedings of the 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation. Prague, Czech Republic, 2012: 1–4.
- [14] EMADEDDIN A, SHAD S, RAHIMIAN Z, et al. High mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using novel structure[J]. *AEU-international journal of electronics and communications*, 2017, 71: 152–156.
- [15] FARAHBAKHSI A, MOHANNA S, TAVAKOLI S. Reduction of return loss and mutual coupling in two-dimensional microstrip array antennas by using hexagonal patches[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Mechanical and Electrical Technology. Singapore, Singapore, 2010: 319–322.
- [16] BALANIS C A. Antenna Theory[M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley-InterScience, 2005.
- [17] TAM W Y, LAI A K, LUK K M. Mutual coupling between cylindrical-rectangular microstrip antennas[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 1995, 43(8): 897–899.

本文引用格式:

王文君, 刘长军. 一种 C 波段基于发卡结构的低耦合贴片天线 [J]. *应用科技*, 2021, 48(1): 71–75.

WANG Wenjun, LIU Changjun. Mutual coupling reduction by using a hairpin based structure for a C band patch antenna pair[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(1): 71–75.

(上接第 70 页)

- [12] 崔华, 田尚伟, 王伟, 等. 基于三维包络展开的车型识别 [J]. *中国科技论文*, 2019, 14(11): 1241–1248.
- [13] 李庆忠, 何东晓, 等. 基于聚类的背景建模与运动目标检测方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(8): 193–195, 203.
- [14] 许益成, 谭文安, 陈丽婷. 基于改进混合高斯模型的运动目标检测算法 [J]. *控制工程*, 2018, 25(4): 630–635.
- [15] 易诗, 张洋溢, 聂焱, 等. 红外图像中快速运动目标的检测与跟踪方法 [J]. *红外技术*, 2019, 41(3): 268–272.
- [16] 刘小静, 薛峰. 基于边缘对比差分算法的运动目标检测 [J]. *计算机工程*, 2018, 44(10): 246–251.

本文引用格式:

徐武, 郭兴, 文聪, 等. 基于混合信息的运动目标检测优化研究 [J]. *应用科技*, 2021, 48(1): 66–70, 75.

XU Wu, GUO Xing, WEN Cong, et al. Optimization of moving target detection based on mixed information [J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(1): 66–70, 75.