

# 一种基于介质集成悬置线的 C 波段孔径耦合天线阵列设计

牟成林,王玲,刘长军

(四川大学电子信息学院,成都,610064)

cjliu@scu.edu.cn

**摘要:** 本文提出了一种基于介质集成悬置线(SISL)的孔径耦合天线单元,利用介质集成悬置线的多层板结构优势设计输入馈线和孔径耦合馈电,天线具有损耗小、功率容量大、电磁屏蔽性能好、自封装的特点。基于该天线单元,采用一分四馈电功分网络,设计并加工一种  $2 \times 2$  天线阵列,实测工作频带为 5.74~5.9 GHz,在工作频率为 5.8 GHz 时,最大辐射方向上增益为 13.2 dBi。

**关键词:** 介质集成悬置线;孔径耦合天线;天线阵列;自封装

## C-band Aperture Coupled Antenna Array Design Based on Substrate Integrated Suspended Line

Chenglin Mou, Liang Wang, and Changjun Liu

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064)

**Abstract:** An aperture coupled antenna based on suspended integrated suspended lines(SISL) is proposed in this paper. The input feeding line and aperture coupled structures take the advantages of multi-layer board SISL structures. The antenna shows the characteristics of low loss, high power capacity, well electromagnetic shielding performance, and self-packaging. Based on the antenna element, a  $2 \times 2$  antenna array consisting of a power distribution network is designed and fabricated. The measured bandwidth of the antenna array is from 5.74 to 5.9 GHz, and the gain at maximum radiation is 13.2 dBi when the operation frequency is 5.8 GHz.

**Keywords:** substrate integrated suspended line; aperture coupled antenna; antenna array; self-package

## 1 引言

微带天线物理尺寸小,结构紧凑,方便与其他天线和微波电路集成,具有灵活的设计理念和广阔的应用场景,在移动通信、卫星导航、电子对抗等领域发挥重要作用<sup>[1][2]</sup>。孔径耦合馈电<sup>[4]</sup>因其馈线与辐射贴片的分离式设计,具有更灵活的匹配特性和更好的集成化设计效果,广泛应用于天线阵列设计中。

介质集成悬置线(SISL)由多层 PCB 板堆叠而成,具有结构简洁和成本低的优势。SISL 可以把馈

电网络和天线集成到一起,具有结构紧凑的优势。本文利用 SISL 结构设计完成了一款 C 波段天线阵列。

## 2 天线单元的结构分析与设计

介质集成悬置线<sup>[4]</sup>的结构如图 1 所示,采用五层介质基板堆叠,分别为 S1—S5,五层介质基板均双面覆铜,分别为 G1—G10。金属化通孔贯穿五层介质基板,模拟理想电边界条件。S2 和 S4 中间挖空作为支撑结构,形成空气腔。电路结构主要设计在 S3 的上下金属层 G5 和 G6。利用铆钉将五层介

质基板压合固定。与传统悬置带状线相比,介质集成悬置线保留了其原有的结构和性能优势,并具有加工成本低、重量轻、集成度高、自封装的特性。

本文设计的孔径耦合天线采用介质集成悬置线进行馈电,充分利用其多层板的结构优势,将 S1 的 G1 金属层设计为辐射贴片,在 G2 金属层开缝,保留馈线的悬置线结构,通过缝隙耦合将能量传递给辐射贴片,将孔径耦合馈电的优势和介质集成悬置线的优势结合起来。

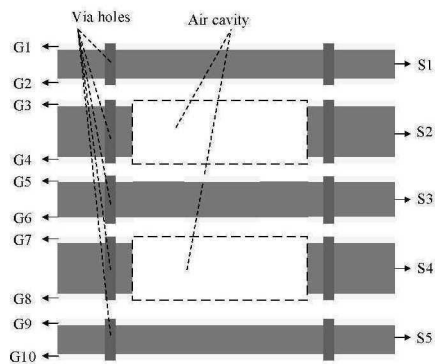


图1 介质集成悬置线横截面示意图

孔径耦合微带天线示意图如图2所示。天线辐射贴片位于 S1 介质基板的上层 G1 金属层,耦合缝隙位于 S1 下层的 G2 金属层,馈线位于 S3 介质基板上层的 G5 金属层。S1 和 S3 介质基板用于电磁能量的传输和辐射,为减少能量在介质基板上的损耗,提高天线整体结构的电性能,采用损耗角正切值较小的 F4B 板材,厚度 1 mm。S2 和 S4 介质基板采用中间挖空的结构形成空气腔,起到支撑作用,S5 介质基板双面覆铜模拟金属地,起到电磁屏蔽的作用,

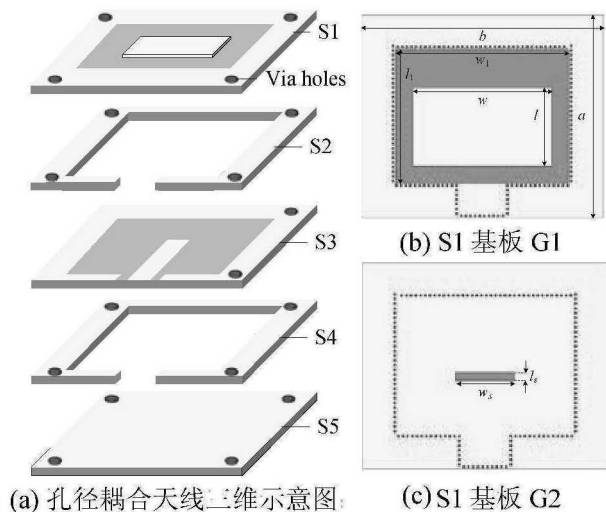


图2

这三层介质基板采用硬度高、成本低的 FR-4 板材, S2、S4 基板厚度 1.6 mm, S5 基板厚度 0.6 mm。

加工实物并测试,选取 SMA 同轴接头为介质集成悬置线馈电,将接头的法兰盘与悬置线 G1、G10 焊接确保共同接地。采用 Agilent 矢量网络分析仪进行 S 参数测试,测试结果如图3所示。在 5.8 GHz 频率处,天线回波损耗达到 28.2 dB,在 5.72~5.9 GHz 频率范围内,天线回波损耗大于 10 dB,阻抗带宽 180 MHz。

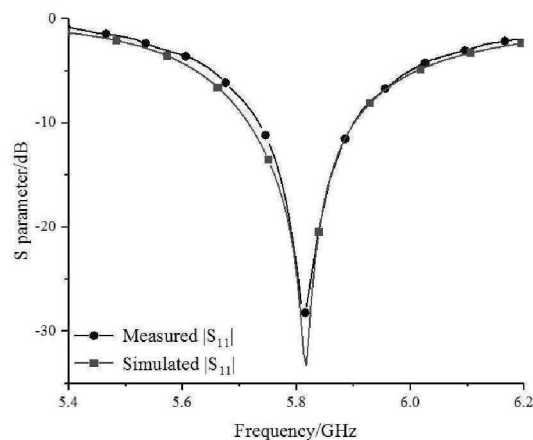


图3 天线仿真与测试 S 参数

图4所示是工作频率为 5.8 GHz 时孔径耦合天线 E 面和 H 面仿真和测试的归一化方向图,其中方向图测试使用微波暗室。仿真和实测方向图吻合良好,天线最大辐射方向位于法向,实测最大辐射方向上的增益为 6.7 dBi。

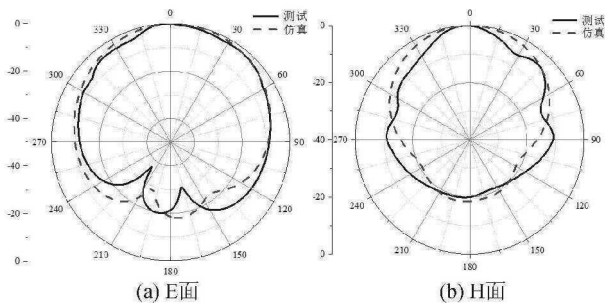


图4 5.8 GHz 时天线仿真和测试归一化辐射方向图

### 3 天线阵列的结构分析与设计

为了满足高增益需求,设计  $2 \times 2$  天线阵列。其馈电功分网络设计在介质集成悬置线 S3 介质基板的 G5 金属层,平面示意图如图5所示。依据传输线“阻抗变换理论”,实现一分四功率等分的功分网

络,使四个输出端口可以对天线阵元等幅同相激励。

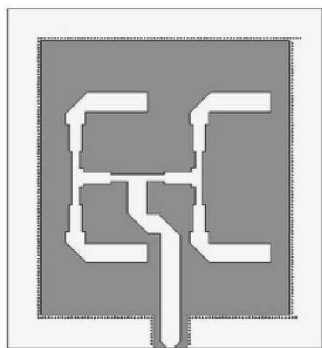


图5 馈电功分网络 G5 示意图

图6所示是天线阵列 S1 介质基板的 G1 金属层和 G2 金属层的平面示意图,  $2 \times 2$  辐射贴片阵列设计在 G1 层,耦合缝隙设计在 G2 层,通过功分网络给天线阵列实现等幅同相馈电。阵元之间的初始间隔依据阵列天线理论,设置合适的初始数值抑制栅瓣。利用全波仿真软件进行天线阵列的优化。

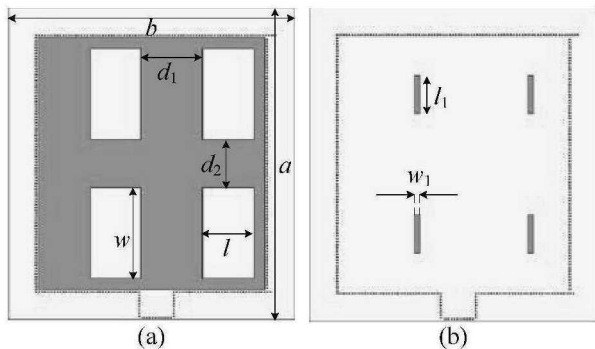


图6  $2 \times 2$  孔径耦合天线阵列示意图

图7是天线阵列加工实物图。采用 Agilent 矢量网络分析仪进行 S 参数测试,结果如图8所示。在中心频率 5.8 GHz 处,回波损耗大于 25 dB,在 5.74~5.9 GHz 频率范围内,回波损耗大于 10 dB,绝对工作带宽为 160 MHz。

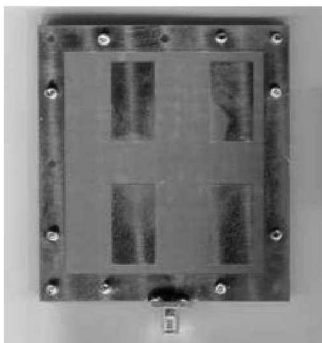


图7 孔径耦合天线阵列实物图

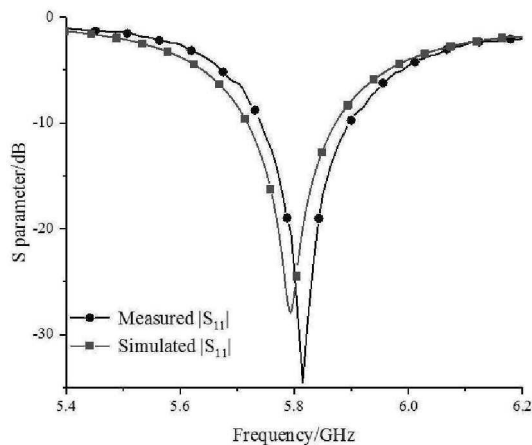


图8 仿真与测试 S 参数

图9所示是工作频率为 5.8 GHz 时天线阵列 E 面和 H 面仿真和测试的归一化辐射方向图,其中方向图测试使用微波暗室。由测试结果可知,仿真和实测方向图具有较好的一致性,天线最大辐射方向位于法向,天线阵列的栅瓣抑制效果较好,能量主要集中在最大辐射方向,实测最大辐射方向上的增益为 13.2 dBi。

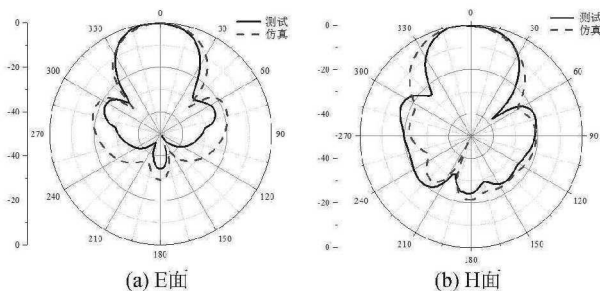


图9 阵列天线仿真与测试归一化辐射方向图

## 4 结论

本文提出了一种基于介质集成悬置线的孔径耦合天线,并以天线为单元设计同相馈电的  $2 \times 2$  天线阵列,天线具有损耗小、功率容量大、电磁屏蔽性能好、自封装的特点,克服了传统孔径耦合馈电方式的缺点,性能良好,具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] RAMLI N, ALI M T, ISLAM M T, et al. Aperture-Coupled Frequency and Patterns Reconfigurable Microstrip Stacked Array Antenna[J]. IEEE Transactions on

- Antennas and Propagation, 2015, 63(3): 1067–1074.
- [2] 杨弋澜, 刘长军. 一种新型微带贴片微波整流天线设计[J]. 应用科技, 2017, 44(4): 60–63.
- [3] CROQ F, POZAR D M. Millimeter-wave design of wide-band aperture-coupled stacked microstrip antennas[J]. IEEE Trans Antennas & Propagation, 1991, 39(12): 1770–1776.
- [4] LI L, MA K, MOU S. Modeling of New Spiral Inductor Based on Substrate Integrated Suspended Line Technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(8): 2672–2680.
- [5] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.