

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108020

低成本宽带高效率堆叠贴片天线

李荣政^{1,2} 王沛¹

(1.中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094; 2.中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘要: 为克服合成孔径雷达中现有微带天线带宽窄、效率低、成本高的缺陷,提出了一种在低成本FR4基板上实现的X波段宽带高效率堆叠微带贴片天线。天线通过多层FR4基板堆叠方式构成,通过空气腔的引入,天线的有效介电常数和介质损耗得到降低,天线的效率和带宽得到提升。利用寄生贴片在带内增加了谐振点,使得天线的带宽得到进一步增大。同时为补偿馈电探针的寄生电感,利用微带匹配器对天线的输入阻抗进行匹配。实测表明,天线输入驻波低于2.0的频率范围为7.7~11.7 GHz,相对带宽大于40%。天线的增益为7.6 dBi,效率为83%。与传统微带贴片天线相比,具有宽带、高效、低成本的特点,具有一定应用前景。

关键词: 微带贴片天线;宽带;高效率

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Low-cost wideband high-efficiency stacked patch antenna

Li Rongzheng^{1,2} Wang Pei¹

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to overcome the defects of narrow bandwidth, low efficiency and high cost of existing microstrip antennas, an X-band broadband and efficient stacked microstrip patch antenna is proposed on a low cost FR4 substrate. The antenna is composed of multilayer FR4 substrate stacks. Through the introduction of air cavity, the effective dielectric constant and dielectric loss of the antenna are reduced, and the efficiency and bandwidth of the antenna are improved. The use of parasitic patches increases the reflection zero in the band, which further enhances the bandwidth of the antenna. At the same time, in order to compensate the parasitic inductance of the feed probe, the input impedance of the antenna is matched by microstrip line. Simulation and experimental results show that the frequency range of input VSWR less than 2.0 is 7.8~11.6 GHz, and the relative bandwidth is 40%. The antenna gain is 7.6 dBi and the efficiency is 83%. Compared with the traditional microstrip patch antenna, it has the characteristics of broadband, high efficiency and low cost, and has broad application prospects.

Keywords: microstrip patch antenna; wideband; high efficiency

0 引言

合成孔径雷达能够进行高分辨率遥感成像,且不受天气和昼夜影响,从1952年首次提出至今,得到了巨大的发展,在地质、海洋、森林的遥感监测中起到了不可替代的作用。合成孔径雷达其中一个关键性能指标是分辨率,对于合成孔径雷达而言,其距离分辨率与信号的带宽直接相关,对于现在较为前沿的0.1 m分辨率,则需要达到3 GHz带宽^[1-2];同时,合成孔径雷达在轻小载体如无人机中的应用对天线的轻量化提出了较高要求,因此需要一种宽带、高效、轻量化、低剖面的天线。现有系统中广泛使用的天线形

式主要有波导缝隙天线、开口波导天线、抛物面天线、微带天线等^[3]。波导天线等形式具有较好的带宽、很高的辐射效率,但存在剖面较高、质量较大、加工复杂困难的缺点,但由于一般波导天线均为金属材料制成,较大的重量限制了其在轻小载体系统上的应用;抛物面天线具有高增益、高效率、易于实现多波束的优点,特别地,轻量化、可展开的抛物面天线在星载系统中具有广泛应用,但其较大的尺寸重量限制了其应用场景;微带贴片天线具有低剖面、轻量化等优点,但其固有的带宽窄、辐射效率低等缺陷,使微带贴片天线难以在宽带系统中应用。

多年以来,有大量研究针对微带贴片天线进行宽带化

收稿日期:2021-10-08

与高效化改进^[4]。对于宽带化最直接的方法是改变天线介质的厚度和常数,较厚的介质和较低的介电常数能够显著的扩大微带天线的带宽,减小介质损耗和导体损耗,故微带贴片天线一般使用较厚、介电常数较低的介质。构成但较厚的介质所引入的表面波损耗使得天线的辐射特性受损,降低了辐射效率^[5];通过在贴片上增加各种形式的槽,在贴片天线的固有谐振模式附近引入多种附加谐振模式能够扩大带宽^[6],但沟槽破坏了天线固有的电流分布,天线的波瓣产生畸变、倾斜,交叉极化抑制也一定程度的劣化;在贴片天线上添加附加的超表面,与馈电贴片产生耦合谐振,能扩大带宽^[7],但这种方式存在设计复杂,辐射模式不稳定的问题;在主贴片天线之上增加附加贴片,使其相互耦合,能够提升贴片天线的带宽^[8]。由于与单贴片天线相似的轴对称形式,其辐射特性与单贴片天线基本一致。为减小介质损耗,微带贴片天线通常需要在损耗较低的高频基板中实现,这大大的提高了其加工成本。近年来,在微带线、带状线、集成波导的基础上,通过将介质或部分介质用空气填充,产生了空气基片集成同轴线等技术^[9],具有低损耗、高Q值的特点,能够利用低成本介质构建低损耗、高性能微波器件,如喇叭天线^[10]、低损耗滤波器^[11-12]、低相位噪声微波振荡器^[13]。

在本文中,提出了一种X波段宽带高效率堆叠贴片天线,采用低成本FR4材质。天线由5块FR4基板堆叠构成,在基板层中引入了空气腔,降低了天线等效介电常数,减小了基板引入的介质损耗;寄生贴片与馈电贴片间的互耦合,增加了一个谐振模式,进一步增加了天线带宽;主贴片由探针馈电,为补偿馈电探针的寄生电感,设计了两节微带线匹配器,使目标频带内达到良好匹配。该天线工作频率为7.7~11.7 GHz,相对带宽大于40%,增益为7.6 dB,辐射效率为83%。

1 天线结构与仿真

1.1 天线结构

天线总体结构如图1所示。天线由5层PCB基板构成,均为FR4材质。基板介电常数为4.4,损耗角正切 $\tan\delta = 0.01$ 。

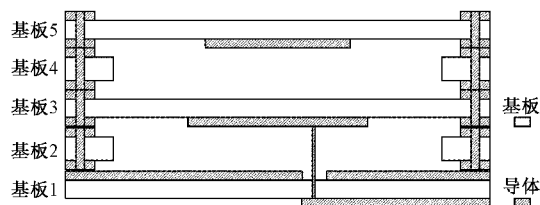


图1 天线结构图

基板的叠层结构确定过程如下:基板1起到馈电作用,连接SMA连接器和天线单元;基板2和基板4构成贴片天线的空气谐振腔,其厚度应较大以实现较大的带宽;基板3和基板5仅对贴片单元起到支撑作用,其厚度应较小以最

小化介质基板所引入的介质损耗。介质基板1的厚度为1 mm,基板2和基板4的厚度为1.6 mm,基板3和基板5的厚度为0.4 mm,所有导体层的厚度均为35 μm ,为减小基板3和基板5中的电场造成介质损耗,将贴片分布于基板3和基板5的下表面;基板周围利用金属层利用过孔联通,形成腔体以约束天线的辐射模式;天线利用探针馈电,微带线匹配器对探针的寄生电感进行补偿。

1.2 天线电磁仿真

首先对不含匹配器的天线进行仿真,由与贴片所在的介质环境较为复杂,难以利用传统模型进行求解,将介质等效为空气求得贴片的初始尺寸,然后通过优化得到贴片的精确尺寸。通过优化两个贴片的尺寸分别确定为11.7 mm \times 11.7 mm和8.5 mm \times 8.5 mm,探针馈电点距贴片中心5.4 mm,天线的仿真模型如图2所示。对天线的输入主从进行仿真,结果如图3所示。

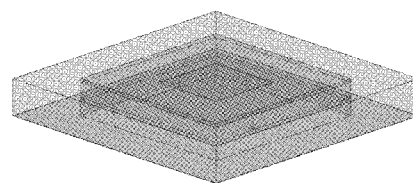


图2 天线仿真模型

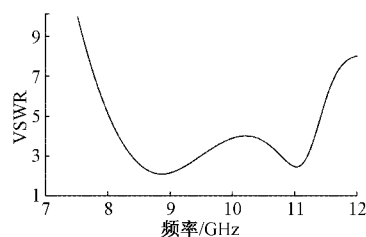


图3 天线输入驻波特性

从仿真结果来看,输入驻波在整个频段内较高,匹配不佳;从阻抗圆图可以看出,天线的输入阻抗偏离匹配点,可以等效为天线输入阻抗与馈电探针寄生电感串联,如图4所示。

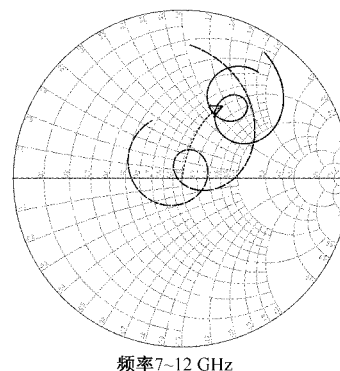


图4 寄生电感对输入阻抗的影响

仿真得到天线方向图如图5所示,天线的峰值增益达

到 8.8 dBi,辐射效率为 98%,可见天线性能较好;为改善天线匹配,利用匹配电路对探针的寄生电感进行补偿。将天线输入阻抗导入 ADS 软件中利用传输线进行匹配。

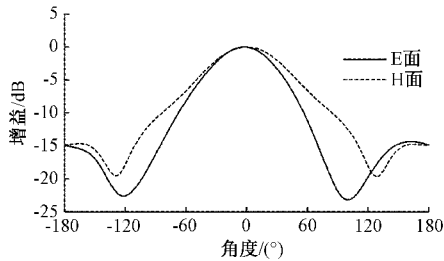


图 5 天线方向图(10 GHz)

匹配器由两节传输线构成,原理如图 6 所示。

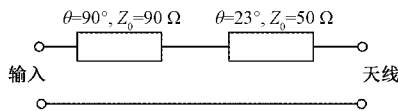


图 6 匹配器原理图

匹配后天线输入驻波如图 7 所示。

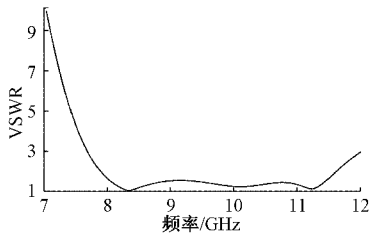


图 7 电路仿真驻波特性

通过匹配,在 7.8~11.5 GHz 频率范围内,天线的输入驻波系数效率 2,匹配良好;将匹配电路在 HFSS 中利用微带线进行实现并仿真,得到天线的输入驻波如图 8 所示。

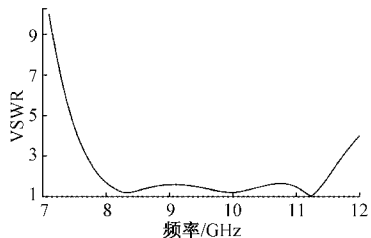


图 8 电磁仿真驻波特性

电磁仿真结果与电路仿真结果基本吻合,在 7.8~11.6 GHz 频带内驻波均小于 2,匹配良好。由于馈电微带线和匹配器的损耗,此时天线的增益和辐射效率有所下降,带宽有所扩大;此时天线的辐射效率为 93%,天线峰值增益为 8.1 dBi,天线方向图基本保持不变。

1.3 误差分析

在实际生产中,由于基板的几何尺寸、介电常数等参数存在一定公差。若天线对各部分加工公差过于敏感,则难以实用,需要对加工公差进行误差分析。分别对基板厚度、

基板介电常数进行参数扫描

对基板厚度进行±0.1 mm 参数扫描,其输入驻波如图 9 所示。

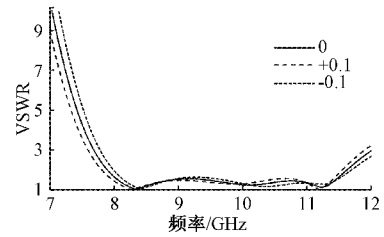


图 9 基板厚度±0.1 mm 输入驻波

对基板介电常数进行范围为±0.2 的参数扫描,输入驻波如图 10 所示。

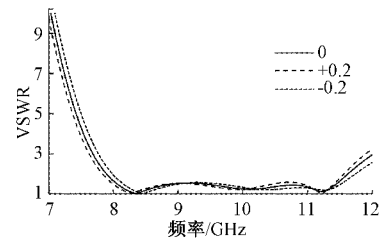
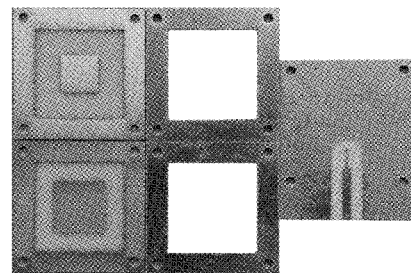


图 10 基板介电常数±0.2 输入驻波

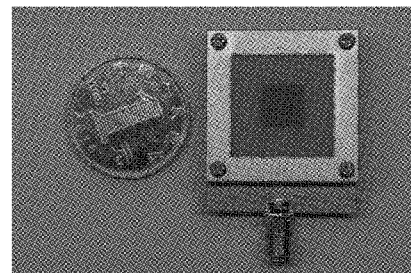
通过在基板中引入空气腔,减小了基板中场的分布,降低了介质基板参数变化对天线性能的影响。从对天线的参数扫描结果可知,天线对加工误差的容忍度高,具备较高的实用性。

2 实测结果

天线实际加工组装后的实物如图 11 所示,测试端口采用 SMA 连接器,整体采用金属螺钉固定。



(a) 天线各层实物



(b) 天线组装后实物

图 11 天线实物图

利用网络分析仪对天线的输入驻波进行测量,实测结果和仿真结果对比如图12所示。从测量结果可知,天线实测带宽较仿真带宽偏大,这可能是由于实际基板的损耗略高导致;在目标频带内的输入驻波系数均低于2.0。

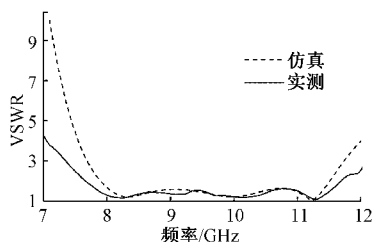


图12 天线输入驻波实测与仿真对比

天线的实测方向图如图13所示,天线的实测增益为7.6 dBi,效率利用惠勒法测得^[14-15],为83%;相较于仿真结果,天线的增益和效率略低,其误差来源主要包括:馈电微带线和SMA连接器损耗;仿真与实测中基板损耗差异;导体粗糙表面和导体氧化的影响。

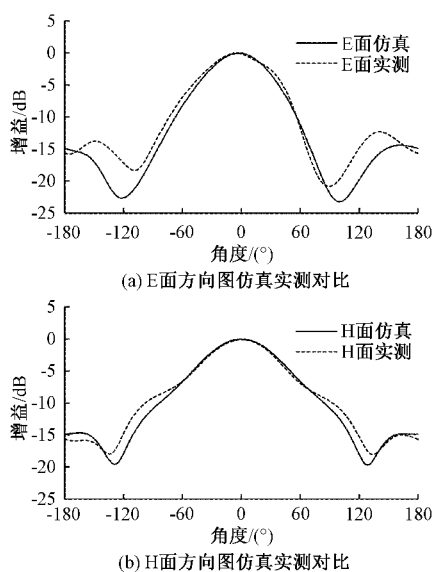


图13 天线方向图实测与仿真对比

实测方向图相比仿真结果有一定偏斜,可能的原因包括:测试电缆的影响;实际天线与仿真天线结构差异。

从以上实测结果可以看出,天线的实测与仿真结果吻合的较好。现有研究结果如表1所示,与表1中文献相比,

表1 与现有研究对比

文献	带宽/%	增益/dBi	效率/%	介质
[7]	25.0	9.3	95(仿真)	5880+FR4
[8]	17.5	9.7	/	FR4
[16]	15.2	6.8	/	/
[17]	31.0	7.7	/	4003
本文	41.2	7.6	83	FR4

本文所提出的天线具有最高的带宽;与文献[7]相比,本文所提出天线仿真辐射效率相近,且未使用等低损耗介质基板;可见本文所提出的天线具有宽带、高效、低成本的特点。

3 结 论

本文提出了一种低成本宽带高效率堆叠贴片天线,通过寄生贴片元件和空气腔的引入,提升了天线带宽和效率;通过合理的叠层结构分配,天线效率得到进一步提升,克服了传统微带贴片天线窄带、低效的缺陷,在低成本FR4基板上实现宽带高效辐射。实测结果表明,天线的工范围为7.7~11.7 GHz,相对带宽大于40%,增益为7.6 dBi,辐射效率83%。该天线具有重量轻、成本低、剖面低、高效、宽带的优点,适用于各种宽带通讯和雷达系统。本文中提出的天线目前采用的探针馈电引入了寄生电感,需要进行匹配补偿,且探针在天线装配上存在不便,后续可考虑采用缝隙馈电等方式对该天线进行改进。

参考文献

- [1] 邓云凯,赵凤军,王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报,2012,1(1):1-10.
- [2] 吴一戎,朱敏慧. 合成孔径雷达技术的发展现状与趋势[J]. 遥感技术与应用,2000,15(2):121-123.
- [3] HEES A, STANGL M, ADAMIUK G, et al. Status and future trends of active phased array antennas for AIRBUS space-borne sar systems [C]. 2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST), IEEE, 2019: 1-6.
- [4] 陈蓬旭,李建新. 一种带状线 L 型探针馈电的微带贴片天线设计[J]. 电子测量技术,2021,44(11):28-32.
- [5] 周雯,伍捍东,程光伟,等. 相控阵印刷偶极子阵元间互耦技术研究[J]. 国外电子测量技术,2019,38(3):56-60.
- [6] ATHER S N, SINGHAL P K. Truncated rectangular microstrip antenna with H and U slot for broadband[J]. International Journal of Engineering Science and Technology(IJEST), 2013, 5(1): 114-118.
- [7] WANG R, CHENG Y F, WU O L, et al. Dual-wideband hollowed substrate-integrated stacked antenna for vertically-mounted low-elevation scanning array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 68(8): 5100-5105.
- [8] YAN N, MA K, ZHANG H. A novel substrate-integrated suspended line stacked-patch antenna array for WLAN[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(7): 3491-3499.
- [9] BELENGUER A, ESTEBAN H, BORJA V E. Novel empty substrate integrated waveguide for high-performance microwave integrated circuits[J]. IEEE

- Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(4): 832-839.
- [10] MATEO J, TORRES A M, BELENGUER A, et al. Highly efficient and well-matched empty substrate integrated waveguide H-plane horn antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1510-1513.
- [11] MARTINEZ L, BELENGUER A, BORJA V E, et al. Compact folded bandpass filter in empty substrate integrated coaxial line at S-band[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(5): 315-317.
- [12] DU C, MA K, MOU S. A miniature SISL dual-band bandpass filter using a controllable multimode resonator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(6): 557-559.
- [13] LI M, MA K. Design of a low phase-noise oscillator using cavity resonator in substrate integrated suspended line technology[C]. 2017 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium(EDAPS), IEEE, 2017: 1-3.
- [14] 孙子杰,姜国凯,丁一夫,等. 偏心修正智能网联车辆天线性能测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 41-49.
- [15] 马松辉,芦永超,刘可佳,等. 基于小型无人机的高精度天线测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 36-42.
- [16] LIU N W, ZHU L, CHOI W W, et al. A low-profile aperture-coupled microstrip antenna with enhanced bandwidth under dual resonance [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1055-1062.
- [17] LIN F H, CHEN Z N. Low-profile wideband metasurface antennas using characteristic mode analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 1706-1713.

作者简介

李荣政, 在读研究生, 主要研究方向为射频收发组件设计。

E-mail: lirongzheng19@mails.cas.ac.cn

王沛, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达信号产生技术、合成孔径雷达系统设计。