

超宽带矩形微同轴平面对数周期天线

刘 昊, 谷胜明, 王梦轩, 史永康, 孙向珍, 王梦双,
尹玉刚, 赵广宏, 汪郁东, 陈春明
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 在宽带电子系统轻量化的需求下, 基于 MEMS 矩形微同轴技术设计了 10 GHz~50 GHz 的超宽带平面对数周期天线。天线采用三节矩形微同轴阻抗变换实现 160 Ω 到 50 Ω 的宽频带阻抗匹配, 并通过矩形微同轴转共面波导进行馈电。为展现微同轴的馈电优势, 验证设计的微同轴平面对数周期天线性能, 制备了 50 Ω 矩形微同轴传输线和天线实物并进行了测试。实测结果表明, 在 10 GHz~50 GHz 频段内, 矩形微同轴传输线传输损耗 < 0.22 dB/cm, 两根间隔 0.15 mm 的矩形微同轴传输线间隔高度 > 60 dB。天线实测反射系数 < -8 dB, 增益 > 4 dBi, 增益波动 < 1.6 dB。

关键词: 超宽带; 轻量化; 矩形微同轴; 平面对数周期天线

中图分类号: TN821+.6; TN828.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)02-0011-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220906001

引用格式: 刘昊, 谷胜明, 王梦轩, 等. 超宽带矩形微同轴平面对数周期天线[J]. 遥测遥控, 2023, 44(2): 11-17.

Ultra-wideband rectangular micro-coaxial planar log-periodic antenna

LIU Hao, GU Shengming, WANG Mengxuan, SHI Yongkang, SUN Xiangzhen, WANG Mengshuang,
YIN Yugang, ZHAO Guanghong, WANG Yudong, CHEN Chunming
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Based on the rectangular micro-coaxial fabrication technology, a surface micro-machined 10 GHz to 50 GHz ultra-wideband planar log-periodic antenna is designed under the requirement of lightweight for the wideband electronic system in this paper. To match the nominal antenna impedance of 160 Ω to 50 Ω , a three-step impedance transformer is designed. Besides, a rectangular micro-coaxial line to CPW transition is used to feed the antenna. To display the advantages of the micro-coaxial feeding line and demonstrate the performances of the designed antenna, some 50 Ω micro-coaxial lines and the above log-periodic antenna have been fabricated and measured. The measured results show that, through the whole frequency band, the micro-coax lines have insertion loss as low as 0.22 dB/cm, and high isolation of 60 dB for the neighboring coaxial lines at a distance of 0.15 mm. The designed antenna has return loss as low as -8 dB, and antenna gain above 4 dBi with gain variation less than 1.6 dB.

Keywords: Ultra-wideband; Lightweight; Rectangular Micro-coaxial; Planar Log-periodic antenna

Citation: LIU Hao, GU Shengming, WANG Mengxuan, et al. Ultra-wideband rectangular micro-coaxial planar log-periodic antenna[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(2): 11-17.

引 言

近年来, 国内外大力发展无人机、小卫星、精确制导弹等小型化武器平台。在有限的空间、重量和功率资源限制下, 为提升复杂电磁战场环境下的生存能力, 平台搭载的电子系统正向宽带化、轻量化和智能化等方向快速发展。为满足宽带电子系统轻量化需求, 天线、馈线等无源核心

射频器件需要进一步拓展带宽、减小馈电损耗、降低剖面高度、减轻自身重量。

相比螺旋、锥削槽天线、波导喇叭等超宽带天线, 平面对数周期天线具有频带宽、剖面低、带内增益波动小、方向图对称、相位中心位置固定等优势, 特别是齿状平面对数周期天线的结构更为紧凑。该天线自 1957 年提出以来, 在宽带雷达、通信、电子对抗等领域得到了广泛的应用^[1-4]。

此后, 各种线极化、圆极化、双极化平面对数周期天线相继出现。近年来, 研究人员开始更多地关注天线结构、馈电方式和制备工艺的改进, 以获得更宽的频带、更小的尺寸、更轻的重量和更好的热性能^[5-8]。

本文在矩形微同轴制备工艺获得突破性进展的基础上, 设计并制备了频段覆盖 10 GHz~50 GHz 的齿状平面对数周期天线^[9-12]。为实现 5 倍频程超宽带匹配馈电, 展现天线采用矩形微同轴馈电的优势, 设计并制备了矩形微同轴结构三节阻抗变换段、微同轴转共面波导段和 50 Ω 传输线。相比采用 PCB、LTCC、Si 等加工工艺制备的平面对数周期天线, 该天线兼具剖面低、重量轻、全金属构造、效率高的优势, 在宽带电子系统领域应用前景广阔。

1 平面对数周期天线设计

平面对数周期天线结构简单, 设计过程可参考文献[13]。如图 1 所示, 设计的齿状平面对数周期天线具有自互补结构, 张角 α 、 β 分别为 135°和 45°, 参数 R_n 、 R_{n-1} 、 r_n 、 r_1 分别设计为 11.54 mm、9.55 mm、10.5 mm、1.31 mm, 比例因子 $\tau=R_{n-1}/R_n\approx 0.828$, 比例因子 $\kappa=r_n/R_n\approx 0.91$ 。为适用 10 层 MEMS 微同轴制备工艺, 天线厚度设计为 0.92 mm。

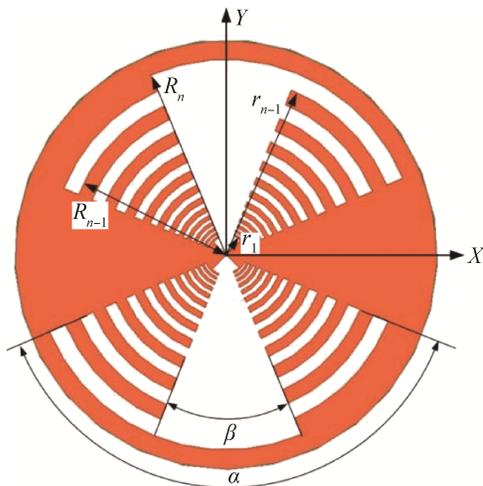


图 1 平面对数周期天线几何模型

Fig. 1 Geometry of the planar log-periodic antenna

2 天线馈电设计

常见 PCB、LTCC、Si 等介质基材的平面对数周期天线通常采用印制微带、平行双线等形式的馈线实现平衡到非平衡馈电。相比介质基材馈线,

基于矩形微同轴制备工艺的微同轴传输线具有可实现微波全频段单模工作、TEM 主模传输无色散、几乎全金属结构低损耗、超薄金属壁重量轻、封闭结构电磁兼容性好等优点, 特别适合用于微波频段的馈电^[13-16]。

2.1 矩形微同轴阻抗变换段设计

平面对数周期天线的带内阻抗约为 160 Ω, 为实现 50 Ω 匹配馈电, 设计了图 2 所示三节级联阻抗变换段, 每节阻抗变换段的长度 L 为 2.4 mm, 约等于中心频率 30 GHz 对应自由空间波长的四分之一。为实现 5 倍频程阻抗匹配, 采用最平坦二项式设计, 通过仿真优化后得到三节变换段的阻抗分别为 64 Ω、81 Ω 和 102 Ω, 阻抗变换段详细设计参数如表 1 所示:

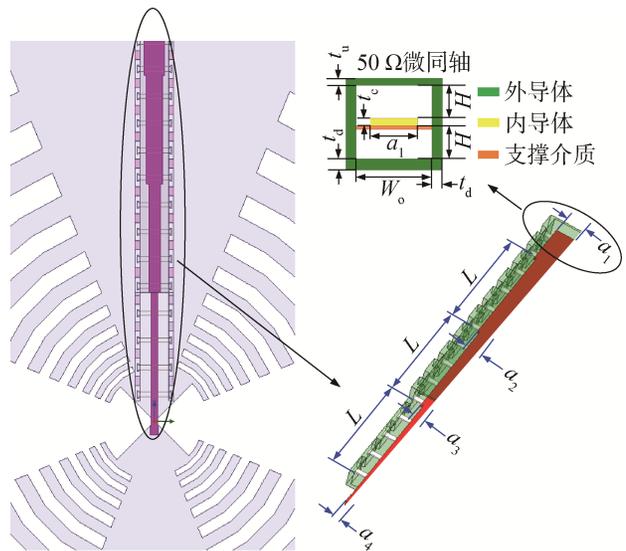


图 2 矩形微同轴阻抗变换段仿真模型

Fig. 2 Simulation model of the recta-coax impedance transformer

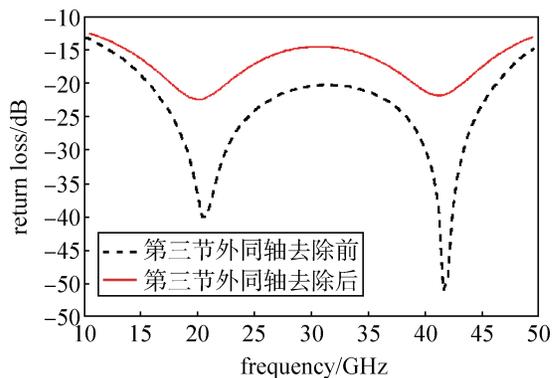
表 1 阻抗变换段设计参数

表 1 Parameters of the recta-coax impedance transformer

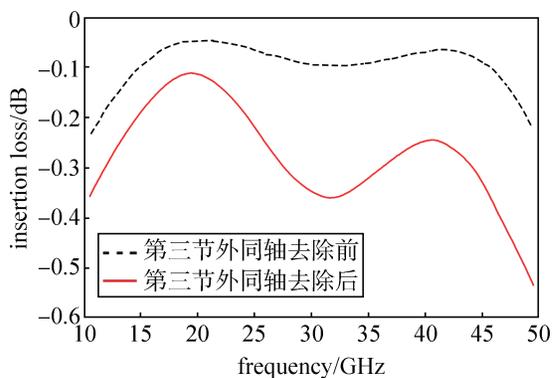
参数	t_u	t_d	t_c	W_o	H	W_c	a_1	a_2	a_3	a_4
设计	值/	0.05	0.1	0.07	0.65	0.3	0.45	0.36	0.26	0.16
		mm								

为完成平衡到非平衡的过渡, 实现阻抗变换段和天线的一体化加工。如图 3 所示, 以平面对数周期天线作为三节阻抗变换器的底面, 去除第三节阻抗匹配段上半部分外同轴金属, 同时内同轴

外延0.75 mm后垂直连接天线的下半部分。图3给出了 S 参数仿真结果,图中可见设计的阻抗变换器全频段 $S_{11} < -12$ dB,实现了良好的阻抗匹配。此外,去除第三节外同轴对阻抗匹配的影响较小。

(a) 回波耗损(S_{11})

(a) Return loss

(b) 插入耗损(S_{21})

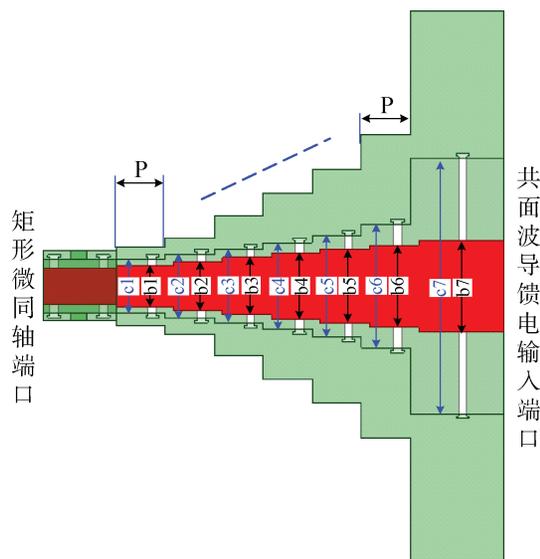
(b) Insertion loss

图3 阻抗变换段 S 参数仿真结果

Fig. 3 S-parameter simulation results of the recta-coax impedance transformer

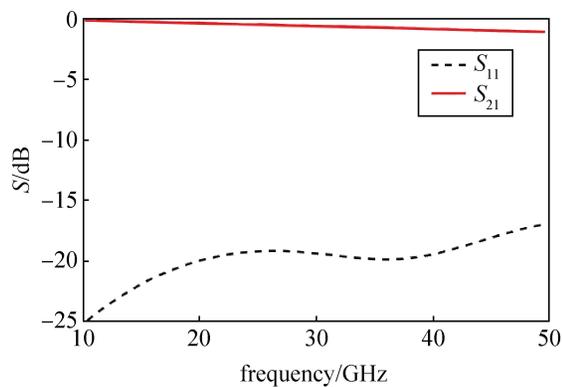
2.2 矩形微同轴转共面波导设计

为便于测试,设计了图4(a)所示矩形微同轴转共面波导变换段。其中,矩形微同轴端口参数与图2所示 $50\ \Omega$ 微同轴端口相同,6节变换段长度 P 均设计为 $0.6\ \text{mm}$,变换段的内导体宽度 $b_1 \sim b_7$ 分别为 $0.5\ \text{mm}$ 、 $0.6\ \text{mm}$ 、 $0.7\ \text{mm}$ 、 $0.8\ \text{mm}$ 、 $0.9\ \text{mm}$ 、 $1\ \text{mm}$ 、 $1.1\ \text{mm}$,变换段的腔体宽度 $c_1 \sim c_7$ 分别为 $0.65\ \text{mm}$ 、 $0.77\ \text{mm}$ 、 $0.9\ \text{mm}$ 、 $1.06\ \text{mm}$ 、 $1.24\ \text{mm}$ 、 $1.5\ \text{mm}$ 、 $3.1\ \text{mm}$ 。图4(b)给出了 S 参数仿真结果,图中可见设计的矩形微同轴转共面波导变换段在全频段可实现良好的阻抗匹配,最大传输损耗小于 $1\ \text{dB}@50\ \text{GHz}$ 。



(a) 仿真模型

(a) Simulation model



(b) 仿真结果

(b) Simulation result

图4 矩形微同轴转共面波导仿真模型和仿真结果

Fig. 4 Simulation model and results of the recta-coax to CPW transformer

2.3 矩形微同轴传输线设计

为展现矩形微同轴的馈电优势和优异的电磁封闭性能,设计了两种相同端口尺寸、不同长度的矩形微同轴传输线,两种传输线长度分别为 $15\ \text{mm}$ 和 $17\ \text{mm}$ 。其中,两根 $17\ \text{mm}$ 的传输线间隔 $0.15\ \text{mm}$,所有传输线阻抗均设计为 $50\ \Omega$ 。图5给出了仿真模型和仿真得到了两种传输线插入损耗。

3 矩形微同轴传输线和天线制备

设计的平面对数周期天线(含馈电)和微同轴传输线均采用10层矩形微同轴工艺制备。矩形微同轴制备工艺,是以美国Nuvotronics公司为首

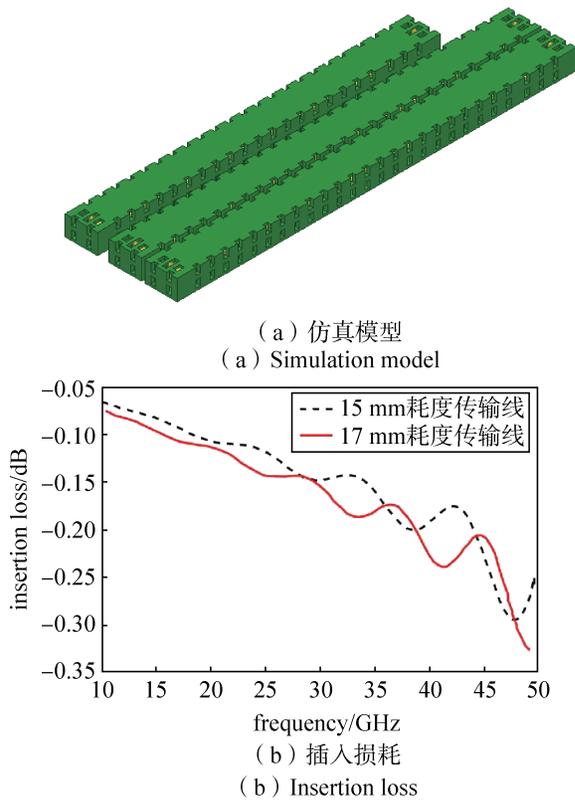


图 5 矩形微同轴传输线仿真模型及插入损耗
Fig. 5 Simulation model and insertion loss of the recta-coax lines

联合科罗拉多大学等高校开发的一种基于 MEMS 工艺的全金属结构三维增材制造技术, 可制备天线、滤波器、耦合器、功分网络等无源射频器件。微同轴器件制备总体上包含数十道工艺工序, 但不同层数的器件制备流程稍有不同。本文涉及的十层结构矩形微同轴工艺流程分解如图 6 所示: 首先, 在硅基片表面生长金属种子层, 采用旋涂法进行紫外厚胶涂覆, 光刻形成底面图形结构; 然后电铸生长金属铜, 再采用平坦化工艺获得光刻胶与金属铜的平面结构; 重复上述工艺获得第二层~第五层结构; 在进行第六层工艺时, 旋涂聚合物材料获得介质支撑; 再重复上述工艺直到完成十层微结构, 最终释放光刻胶牺牲层, 获得空气腔结构。图 7 给出了制备的十层结构矩形微同轴传输线和平面对数周期天线实物照片, 制备完成的两种样件厚度仅 0.92 mm, 重量小于 0.1 g。

4 测试结果

为获取制备的矩形微同轴传输线插入损耗,

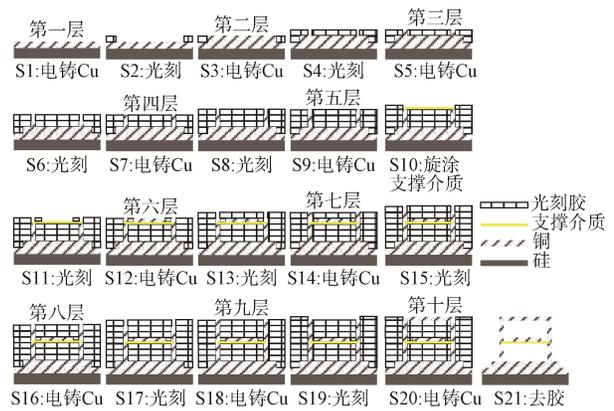


图 6 微同轴制备工艺流程
Fig. 6 Photos of the recta-coax lines and planar log-periodic antenna

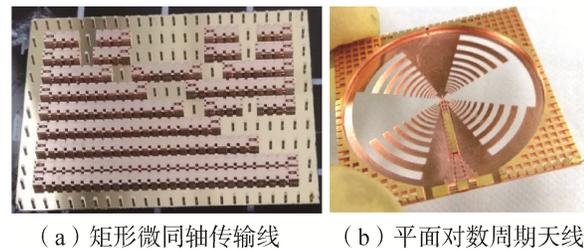


图 7 矩形微同轴传输线和平面对数周期天线实物照片
Fig. 7 Photos of the recta-coax lines and planar log-periodic antenna

基于 CASCADE 探针台和矢量网络分析仪 Keysight N5247B 分别对 15 mm 和 17 mm 长度的传输线进行测试。如图 8 所示, 图中可见 15 mm 传输线实测全频段插入损耗小于 0.33 dB, 即单位长度损耗值小于 0.22 dB/cm; 17 mm 传输线实测插入损耗小于 0.375 dB, 即单位长度损耗值小于 0.22 dB/cm。对比图 5 可知, 两种传输线的插入损耗仿真与实测结果基本一致, 展现出微同轴制备工艺较好的制备精度。图 9 给出了两根 17 mm 传输线实测隔离度曲线, 图中可见全频段线间隔离度大于 60 dB, 展现出微同轴传输线具有较高的电磁屏蔽能力。

为验证设计的微同轴平面对数周期天线性能, 分别对天线进行回波损耗和增益方向图测试。图 10 给出了实测和仿真回波损耗的对比曲线, 图中可见回波损耗的实测最大值约为 -7 dB, 实测结果相比仿真值有所恶化, 恶化的主要因素是受测试工装的影响, 包括工装中射频接插件的回波损耗和微同轴转微带共面波导的失配损耗。图 11 给出

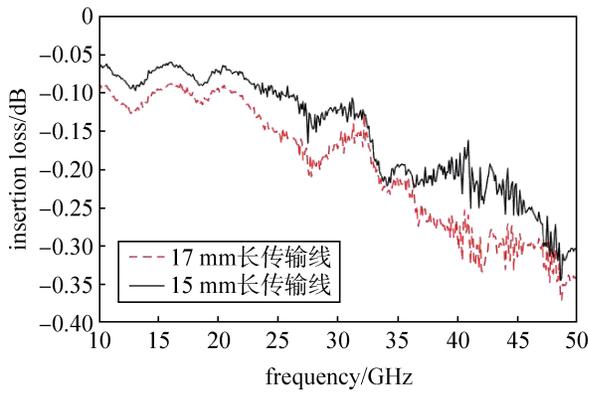


图8 矩形微同轴传输线实测插入损耗

Fig. 8 Measured insertion loss of the recta-coax lines

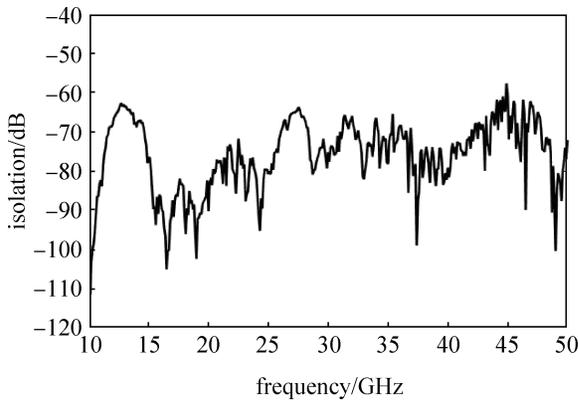


图9 两根17 mm矩形微同轴传输线实测隔离度
Fig. 9 Measured isolation of the two 17 mm recta-coax lines

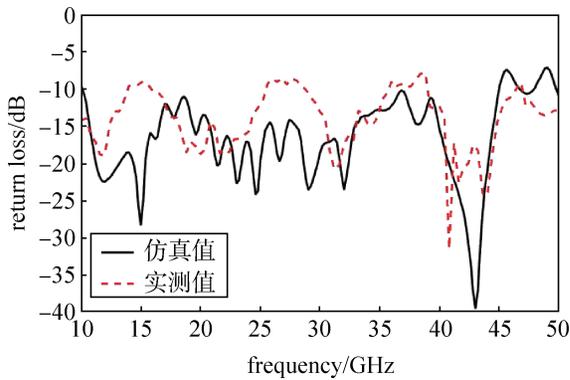
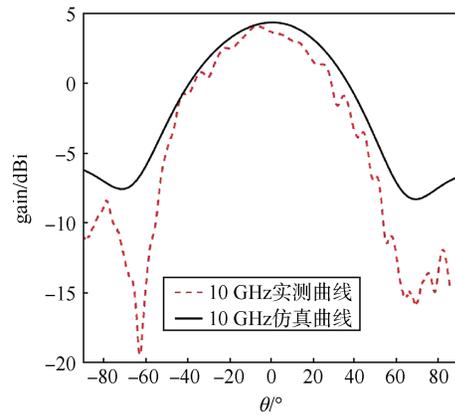


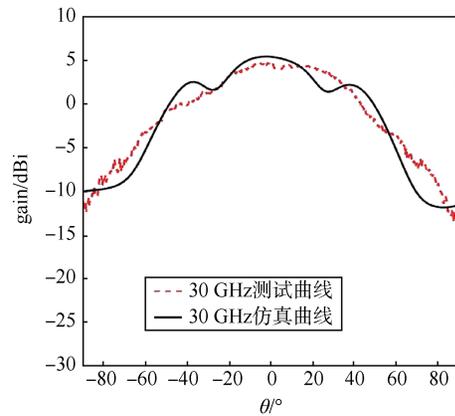
图10 平面对数周期天线仿真和实测回波损耗曲线

Fig. 10 Simulated and measured return loss of the planar log-periodic antenna

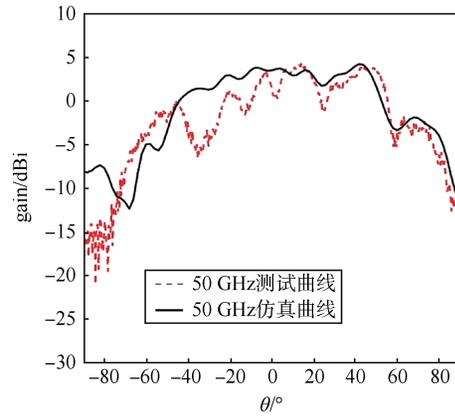
了典型频点实测和仿真E面增益方向图曲线，图中可见实测方向图与仿真结果基本一致，但50 GHz频点的实测方向图抖动较大，可能原因是微同轴天线缺乏支撑，辐射面有所形变导致。因此，后



(a) 10 GHz



(b) 30 GHz



(c) 50 GHz

图11 平面对数周期天线仿真和实测E面方向图曲线

Fig. 11 Simulated and measured E-pattern of the planar log-periodic antenna

续天线改进设计时将考虑增加辐射面支撑结构，例如在辐射面两侧增加泡沫等低介电常数支撑结构，尽可能降低对天线辐射特性影响的同时减小形变。图12给出了天线增益随频率变化曲线，图中可见天线在整个频带内实测增益大于4 dBi，带内增益波动小于1.6 dB。此外，从图12中可见实

测增益相比仿真值有所降低, 增益下降主要由回波损耗的恶化以及测试工装的插入损耗导致。后续, 将考虑采用微同轴工艺制备宽带微同轴转脊波导过渡段, 避免采用插入损耗较大的微同轴转微带共面波导, 利用脊波导的低插损特性进一步减小馈电损耗, 提升微同轴平面对数周期天线的性能。

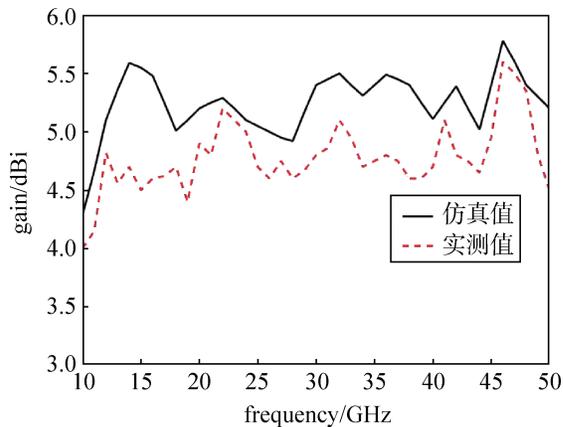


图 12 平面对数周期天线频率增益曲线

Fig. 12 Measured gain VS frequency of the planar log-periodic antenna

5 结束语

本文基于 10 层结构矩形微同轴制备工艺, 设计、制备并测试了 10~50 GHz 频段、厚度仅 0.92 mm 的矩形微同轴传输线和超宽带平面对数周期天线。其中, 矩形微同轴传输线在全频段的传输损耗小于 0.22 dB/cm, 线间隔离度可达 60 dB, 用于天线馈电不仅损耗低, 还具有良好的电磁封闭特性。微同轴超宽带平面对数周期天线在 10~50 GHz 频段内增益大于 4 dBi, 带内增益波动小于 1.6 dB, 重量小于 0.1 g, 全金属结构使其在超宽带轻量化电子系统中具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] DUHAMEL R H, ISBELL D. Broadband logarithmically periodic antenna structures[J]. IRE International convention, 1957, (5): 119-129.
- [2] MRUK J R, SUTTON N, FILIPOVIC D S. Micro-coaxial fed 18 to 110 GHz planar log-periodic antennas with RF transitions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(2): 968-972.
- [3] PHU B H, QUANG P M, PHUOC D T, et al. A log-periodic saw-toothed planar antenna for UHF ultrawideband applications[C]//International Conference on Advanced Technologies for Communications, 2013.
- [4] 郁梅, 许伟伟, 安德越, 等. 太赫兹平面天线的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(3): 369-373. YU Mei, XU Weiwei, AN Deyue, et al. Design of planar terahertz antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(3): 369-373.
- [5] AGHDAM K M P, FARAJI-DANA R, RASHED-MOHASSED J. Compact dual-polarisation planar log-periodic antennas with integrated feed circuit[J]. Proc. IEEE Microw Antennas Propag., 2005, 152(5): 359-366.
- [6] SAMMETA R, FILIPOVIC D S. Quasi frequency-independent increased bandwidth planar log-periodic antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(4): 1937-1944.
- [7] SAITO Y, MRUK J R, FILIPOVIC D S. X-through Q-band log-periodic antenna with monolithically integrated μ -coaxial impedance transformer/feeder[J]. Electronics Letters, 2009, 45(15): 775-776.
- [8] HA J, FILIPOVIC D S. Electrothermal design of bidirectional wide-boom log-periodic antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 1661-1669.
- [9] 汪郁东, 赵广宏, 陈春明, 等. 超宽带矩形微同轴滤波器制备及性能分析[J]. 遥测遥控, 2020, 41(3): 65-70. WANG Yudong, ZHAO Guanghong, CHEN Chunming, et al. Preparation and performance analysis of ultrawideband rectangular micro-coaxial filter[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(3): 65-70.
- [10] 汪郁东, 赵广宏, 陈青松, 等. 用于 PolyStrata 技术的光刻工艺探索研究[J]. 遥测遥控, 2020, 41(3): 65-70. WANG Yudong, ZHAO Guanghong, CHEN Qingsong, et al. Research on lightgraph technology for PolyStrata technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(6): 57-62.
- [11] 北京遥测技术研究所. 一种晶圆级异质结构的平坦化工艺方法: 201910882311.8[P/OL]. 2019-12-31[2022-09-8]. <http://www2.soopat.com/Patent/201910882311>.
- [12] 北京遥测技术研究所. 一种光刻厚胶与金属基底结合力的改善方法: 201911195081.4[P/OL]. 2020-03-27[2022-09-8]. <https://zhuanli.tianyancha.com/b8590fe72341731313b2e495b8d9f144>.
- [13] SAITO Y, LUKIC M V, FONTAINE D, et al. Monolithically integrated corporate-fed cavity-backed antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(9): 2583-2590.

- [14] POPOVIC Z. Micro-coaxial micro-fabricated feeds for phased array antennas[C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2010.
- [15] EHSAN N, VANHILLE K J, RONDINEAU S, et al. Micro-coaxial impedance transformers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(11): 2908-2914.
- [16] OLIVER J M, ROLLIN J, VANHILLE K, et al. A W-band micromachined 3-D cavity-backed patch antenna array with integrated diode detector[J]. IEEE Transactions on Antennas and propagation, 2012, 60(2): 284-292.

[作者简介]

刘 昊 1976年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达设计、微波电路与天线设计。

谷胜明 1984年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为微波成像、电路与天线设计。

王梦轩 1992年生, 博士, 工程师, 主要研

究方向为微波器件与天线设计。

史永康 1978年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为阵列天线、相控阵天线设计。

孙向珍 1976年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为微波电路与天线设计。

王梦双 1989年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为超宽带被动天线、超宽带相控阵设计。

尹玉刚 1982年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为MEMS与传感器技术。

赵广宏 1984年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为传感器及MEMS微工艺技术。

汪郁东 1996年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为RF-MEMS微同轴器件工艺技术。

陈春明 1994年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为传感器及MEMS微工艺技术。

(本文编辑: 潘三英)