

doi:10.3969/j.issn.1003-3106.2025.11.011

引用格式:王鑫,吴丹,王魁.一种用于无线电监测的小型化接收天线设计[J].无线电工程,2025,55(11):2236-2242.
[WANG Cui, WU Dan, WANG Kui. Design of a Miniaturized Receiving Antenna for Radio Monitoring[J]. Radio Engineering, 2025, 55 (11): 2236-2242.]

一种用于无线电监测的小型化接收天线设计

王鑫¹,吴丹¹,王魁²

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所,河北石家庄 050081;
2. 中国人民解放军 31121 部队,江苏南京 210042)

摘要:针对无线电监测系统的低频覆盖不足与天线尺寸问题,基于改进型的偶极子结构提出一种小型化超宽带接收天线。设计采用曲流技术弯折偶极子双臂(尺寸 38.6 mm×134.1 mm×0.8 mm),结合对称寄生单元与挖孔结构优化电流分布,实现带宽扩展。CST 仿真与实测结果表明,天线在 0.7~0.96 GHz 及 1.3~5.3 GHz 频段 $S_{11} < -6$ dB,覆盖 GSM、DCS-1800、WLAN、WiMAX 及 5G NR n77/n78/n79 等标准;2.2 GHz 和 4.4 GHz 辐射效率分别达 96.42% 和 95.63%,5G Sub-6 GHz 平均效率 85.4%±6.8%;3.3~5.0 GHz 最大增益达(4.23±0.54) dBi,较传统偶极子提升 1.8 dBi。该设计通过结构创新解决了低频段覆盖与小型化矛盾,适用于多制式通信监测场景。

关键词:小型化超宽带接收天线;曲流技术;对称寄生单元;挖孔结构

中图分类号:TN82

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:1003-3106(2025)11-2236-07

Design of a Miniaturized Receiving Antenna for Radio Monitoring

WANG Cui¹, WU Dan¹, WANG Kui²

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;
2. Unit 31121, PLA, Nanjing 210042, China)

Abstract: To address the issues of insufficient low-frequency coverage and oversized antennas in radio monitoring systems, a miniaturized ultra-wideband receiving antenna based on improved dipole structure is proposed. The design employs meandering techniques to bend the dipole arms (dimensions: 38.6 mm×134.1 mm×0.8 mm), integrating symmetrical parasitic elements and slotted structures to optimize current distribution and extend bandwidth. CST simulations and measurements demonstrate that the antenna achieves $S_{11} < -6$ dB across 0.7~0.96 GHz and 1.3~5.3 GHz bands, covering standards such as GSM, DCS-1800, WLAN, WiMAX, and 5G NR n77/n78/n79. The radiation efficiency reaches 96.42% at 2.2 GHz and 95.63% at 4.4 GHz, with 85.4%±6.8% average efficiency in 5G Sub-6 GHz bands. The maximum gain of (4.23±0.54) dBi (3.3~5.0 GHz) surpasses conventional dipoles by 1.8 dBi. This structural innovation resolves the low-frequency coverage vs miniaturization trade-off, enabling multi-standard communication monitoring.

Keywords: miniaturized ultra-wideband receiving antenna; meandering technique; symmetrical parasitic element; slotted structure

0 引言

近年来,超宽带天线在无线通信领域越来越受到重用,联邦通信委员会将超宽带天线定义为一种无线电系统,其带宽大于等于 500 MHz,并具有良好的 S_{11} 参数、有用的辐射模式以及成本效益。因此,超宽带天线技术在物联网(Internet of Things, IoT)^[1-4]、无线电监测系统^[5]以及无人机应用^[6-7]等不同领域拥有广阔的应用前景。

最近,国内外众多文献报道实现了许多超宽带特性的天线,但工作在低频段小型化天线方面的研究依旧不深刻。例如,文献[8]中提出了 2 款无线电监测宽带全向性天线,分别为工作频率覆盖 395~705 MHz 频段的三级鞭状天线和工作频率覆盖 165~1 200 MHz 频段的三级环形天线,工作频带较窄并且尺寸较大。文献[9]提出了一款可用于无线

收稿日期:2025-07-22

电监测的超宽带天线,该天线的工作频段覆盖 900 MHz~12 GHz,虽然工作带宽很宽,但是天线的尺寸较大,无法满足例如频谱仪等仪器上的应用。另外,文献[10]利用非福斯特电路技术对应设计的监测天线工作频率为 30~200 MHz,高度为 1.5 cm 的单极子天线,对该天线的增益进行了提高,但其不足之处在于用于无线电监测天线所能覆盖的频段较短。文献[11]设计了一种新颖的宽带全向天线,该天线 2 个花蕾状的单极子实现了在 1.8~7.7 GHz 保持 S_{11} 低于 -10 dB,该天线的带宽与移动通信技术(如 LTE、蓝牙和 IEEE 802.11be)以及无线电定位应用中密集使用的频谱重叠。其在高频特性的增益表现出优秀性能但其缺点在于未覆盖低频段。文献[12]提出一种紧凑的超宽带接收天线,该天线工作频段为 20 MHz~8 GHz,但其尺寸为 500 mm×500 mm×340 mm ($0.033\lambda_0 \times 0.033\lambda_0 \times 0.023\lambda_0$, λ_0 为 20 MHz 的波长)。文献[13]设计了一款双叶形平面天线,天线工作在 18.28 GHz (3.73~22.01 GHz) 的超宽带宽,在高频具有超宽带但其未涉及低频段。文献[14]设计了一种基于双超表面的宽带天线,天线 $S_{11} < -10$ dB 工作频段在 4.8~13.6 GHz,依旧在高频具有超宽带宽但在低频性能不佳。文献[15]设计了一款基于哑铃型缺陷低结构的微带贴片天线,工作频段虽多,但是均在高频段,缺乏低频段。文献[16]设计了一款超宽带紧凑型双锥天线,工作频段为 2~18 GHz,直径为 212 mm。文献[17]设计了一款具有 2 种辐射贴片单元的贴片天线,采用了 3D 打印生产工艺,工作频段为 3.4~3.8 GHz。文献[18]设计了一款短偶极子有源高频(High Frequency, HF)监测天线,该天线的监测频段为 5~30 MHz,适用场合较少。文献[19]设计了一款工作在 2.4~2.5 GHz 的高隔离度同步发射和接收天线,频段过窄。文献[20]提出了一款工作在 1.8~12.5 GHz 的超宽带天线,其尺寸为 33 mm×33 mm×18.2 mm ($0.2\lambda_L \times 0.2\lambda_L \times 0.11\lambda_L$, λ_L 为最低工作频率的波长),剖面高度相对较高。

上述天线中或多或少都存在无法在低频工作、尺寸过大、工作频带过窄等问题,针对此类问题,本文提出一款具有较大带宽的全向接收天线,并且在文献[12]中提到接收天线的指标一般在 -6 dB 以下即可使用,因此该天线的 -6 dB 工作范围为 0.7~

0.96 GHz 以及 1.3~5.3 GHz,能够有效监测到 GSM (890~960 MHz)、数字通信系统(Digital Cellular System, DCS) (1710~1880 MHz)、无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN) (2400~2484 MHz)、WiFi(同样为 2400~2484 MHz)、全球微波互联接入(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX) (3400~3600 MHz),以及 n77、n78、n79(3300~5000 MHz) 等频段。

1 天线结构

为满足大带宽、小型化等要求,研究并提出的天线结构如图 1 所示,图中暗黄色部分为天线贴片,暗绿色部分为介质基板,介质基板采用介电常数为 4.3 的 FR-4 材料,厚度为 0.8 mm。

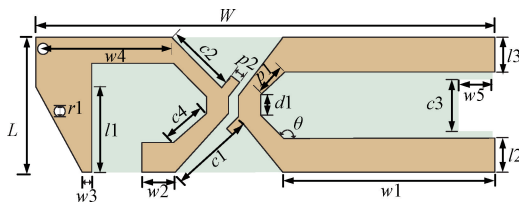


图 1 天线结构示意图

Fig. 1 Antenna structure

本文天线以改进型的偶极子天线为基础进行研究,根据如下公式来确定偶极子天线的大致尺寸,公式考虑到基板的介电常数和缩短效应。

$$L_{\text{total}} = \frac{0.48 \times c}{f_r \times \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2}, \quad (2)$$

式中: f_r 为工作频率, ϵ_{eff} 为有效介电常数, ϵ_r 为介质基板的介电常数, c 为光速。

臂宽根据如下经验公式进行确定:

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r + 1}}. \quad (3)$$

将偶极子天线的双臂进行弯折,通过曲流技术实现天线的小型化,并且在双臂的中部引入对称性的寄生单元,优化电流分布,增加有效电流通路,扩大天线工作带宽,在天线上部通过挖孔,有效提升天线的高频工作性能。

本文采用 CST 电磁仿真软件对天线进行协助仿真,该天线详细参数如图 1 所示,其中 $\theta = 136^\circ$,具体参数取值由表 1 给出。

表 1 天线参数

Tab. 1 Antenna parameters 单位:mm

参数	取值	参数	取值
L	38.6	W	134.1
l_1	24.5	w_1	61.8
l_2	11.8	w_2	9.98
l_3	10	w_3	3
c_1	22.66	w_4	40
c_2	20.76	w_5	10.1
c_3	15	p_1	9.34
c_4	12.84	p_2	2.9
r_1	1.5	d_1	6

2 天线关键参数研究

在最初研究设计阶段,以改进型的偶极子天线为基础,用弯折技术实现在更小的空间中具有符合设计指标的有效电流长度,具体结构如图 2 所示。

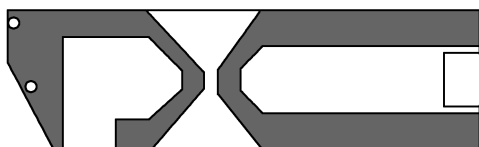


图 2 初始天线模型

Fig. 2 Initial antenna model

初步仿真得到的具体 S_{11} 参数如图 3 所示。图中红色虚线为 -6 dB 的标准线,从图中可以发现,该天线在 2.5 GHz 之后,存在部分频段的 S_{11} 参数大于 -6 dB 的现象。

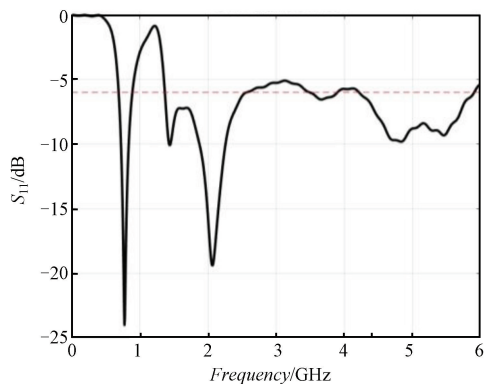


图 3 初始模型 S_{11} 参数

Fig. 3 S_{11} of the initial model

因此本次研究选择共面寄生贴片来拓宽该天线的工作带宽,寄生枝节的位置如图 4 所示。

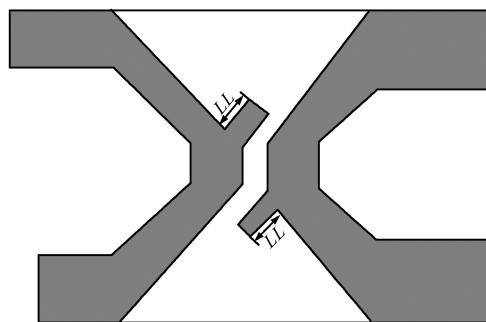


图 4 寄生枝节位置

Fig. 4 Location of parasitic branches

图 4 中所标注的 LL 为寄生枝节的长度,是本次研究的关键参数。寄生枝节通常用于改善带宽,设计为在目标的频率附近谐振,其长度可以初始近似为:

$$LL \approx \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L, \quad (4)$$

式中: ΔL 为边缘缩短量,约等于 0.3 倍的基板厚度。而贴片的宽度根据经验通常为主贴片宽度的 $0.6 \sim 1.2$ 倍,过宽可能引入高次模,过窄降低辐射效率。因此,本研究通过调节寄生枝节的长度 LL 来调节天线的带宽。

通过计算选定寄生枝节长度 LL 为 $2 \sim 6$ mm,通过扫描参数,获得 LL 数值不同时天线 S_{11} 的变化如图 5 所示。红色虚线为 -6 dB 的标准线,从图中可以看出,当 LL 变化时,天线的工作带宽得到了一定扩宽。

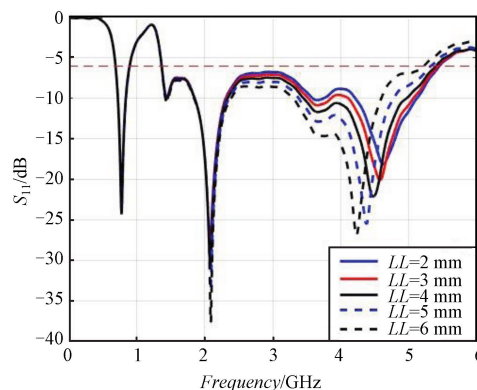


图 5 LL 不同时 S_{11} 的变化

Fig. 5 S_{11} vs LL

扫描参数时,获得 LL 数值不同时天线增益的变化如图 6 所示。从图中可以看出, LL 的变化对于天线增益的影响较小。扫描参数时,获得 LL

数值不同时天线效率的变化如图 7 所示。从图中可以看出, LL 的变化会引起天线在高频段的效率变化。

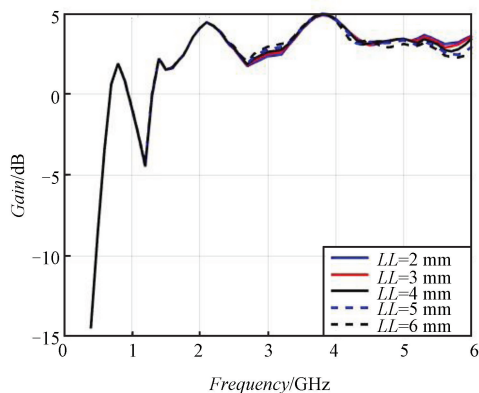


图 6 LL 不同时天线增益的变化

Fig. 6 Antenna gain vs LL

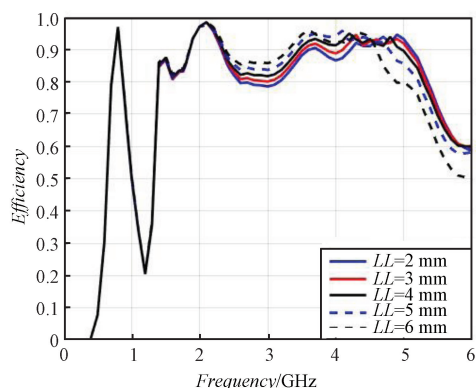


图 7 LL 不同时天线效率的变化

Fig. 7 Antenna efficiency vs LL

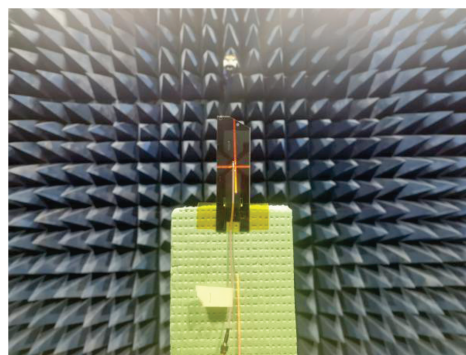
3 仿真与测试结果

本研究针对多制式无线电监测系统的天线设计需求,选取关键频段的中心频率作为方向图优化基准点。各中心频点的具体取值为: GSM (926 MHz), DCS (1 760 MHz), WLAN (2 442 MHz), WiMAX (3 500 MHz), n77、n78、n79 (4 140 MHz)。该选取方案可有效覆盖各制式标准的工作带宽,并为后续天线的多频段兼容性设计提供理论依据。

为验证所提出天线的工作性能,探索仿真与测试结果的一致性,对天线进行了加工和测试。天线实物与天线在暗室测试图如图 8(a)、图 8(b) 所示。



(a) 天线实物



(b) 天线测试

图 8 天线实物与天线测试

Fig. 8 Antenna prototype and testing

图 9 显示了所设计天线的 S_{11} 曲线,其中黑色实线代表最终的仿真结果,红色虚线表示实际测试所得结果。可以观察到,二者在整体趋势上具有良好的 consistency,吻合度较高,验证了仿真模型的有效性与天线设计的可实现性。图中虚横线为 -6 dB 阈值线,作为工作带宽的判断基准。从图中可以看出,天线在 $0.7 \sim 0.96$ GHz 和 $1.3 \sim 5.3$ GHz 频段内的 S_{11} 值均低于 -6 dB,表明其在上述 2 个频段内实现了良好的阻抗匹配,具备较宽的工作带宽,适用于多频段无线电监测场景。

该天线的实际工作效率如图 10 所示,图中黑色为天线仿真的数据曲线,红色为天线实测的数据曲线。由仿真数据可以看出,天线在工作频段内其辐射效率呈现双峰分布,峰值分别达到 96.42% (2.2 GHz) 和 95.63% (4.4 GHz),并且始终能够保持高于 50% 的效率。在 5G Sub-6 GHz 核心频段 (3.3~5.0 GHz) 平均效率为 $85.4\% \pm 6.8\%$,显著优

于3GPP TS 38.104规范阈值。然而,0.4 GHz频点因输入阻抗失配导致效率骤降至1.66%,而高频段(>4.6 GHz)受介质频散及趋肤效应影响,效率以-7.2%/GHz斜率衰减。但是,因为制作工艺的影响,导致天线在1 GHz之后的工作效率逐渐低于仿真数据。测试结果表明,该天线在工作频段内辐射效率较高,整体能量转换效能表现良好。

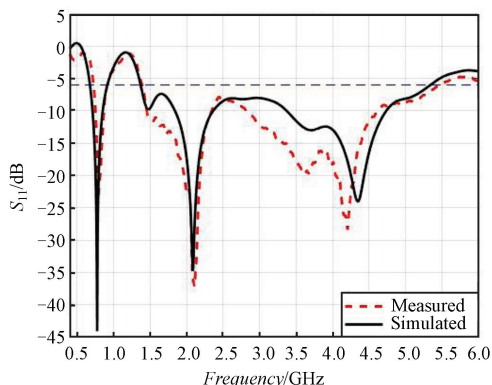


图9 S_{11} 参数
Fig. 9 S_{11} parameter

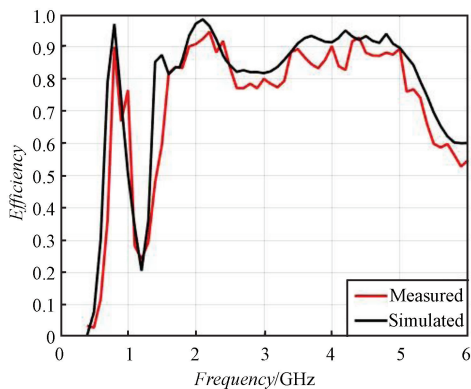


图10 天线效率
Fig. 10 Antenna efficiency

该天线的增益如图11所示,图中黑色为天线仿真的数据曲线,红色为天线实测的数据曲线。仿真数据中,基于提供的天线增益数据分析:该天线在1.6~5.0 GHz频段表现最优(增益普遍>2 dBi,带宽约3.4 GHz),适合宽带应用;其中2.2 GHz(峰值4.25 dBi)和3.8 GHz(峰值4.82 dBi)形成双工作高峰,可用于针对双频通信场景(如WiFi 2.4 GHz/5 GHz或5G Sub-6 GHz)。然而,低频性能较差(0.4~1.0 GHz增益为负值,最低至-17.1 dBi),高频衰减明显(>4 GHz后增益逐步降至6 GHz的2.77 dB)。

此外,频段内存在异常波动(如1.2 GHz骤降至-3.79 dB)。相较于仿真数据,实测数据因为测试环境和制作工艺的影响,导致增益均低于仿真数据,但是趋势相吻合。

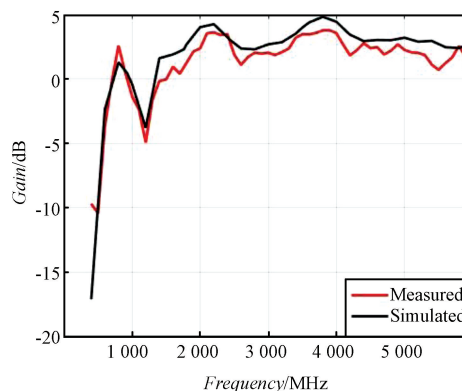


图11 天线增益
Fig. 11 Antenna gain

天线工作于0.926、1.76、2.442、3.5、4.14 GHz的方向图如图12~图16所示。图中红色虚线为天线实测方向图,蓝色实线为天线仿真方向图,从图中可以看出,天线在目标频段内的E面与H面实测辐射方向图与仿真结果吻合良好,且在工作频段展现出优异的全向辐射特性。

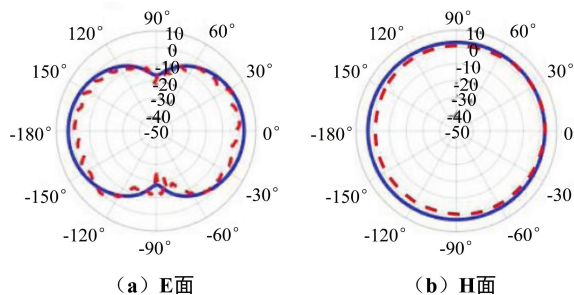


图12 天线工作于0.926 GHz的2D方向图
Fig. 12 Antenna 2D radiation pattern at 0.926 GHz

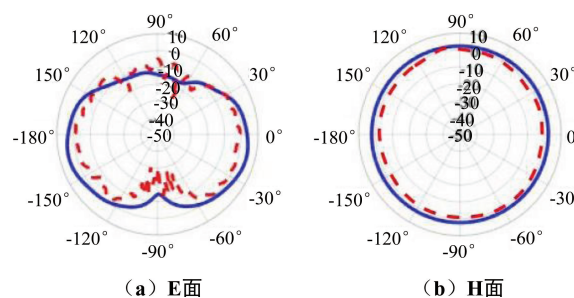


图13 天线工作于1.76 GHz的2D方向图
Fig. 13 Antenna 2D radiation pattern at 1.76 GHz

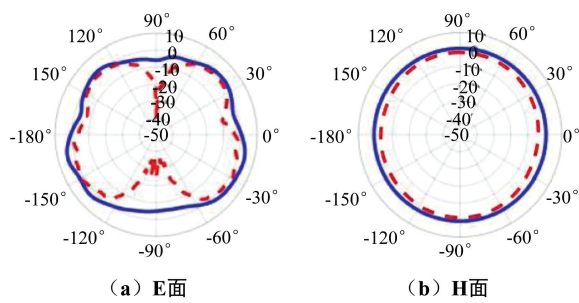


图 14 天线工作于 2.442 GHz 的 2D 方向图
Fig. 14 Antenna 2D radiation pattern at 2.442 GHz

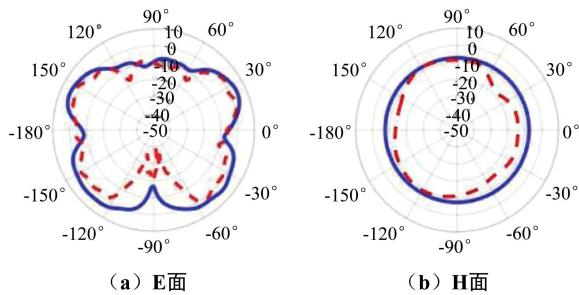


图 15 天线工作于 3.5 GHz 的 2D 方向图
Fig. 15 Antenna 2D radiation pattern at 3.5 GHz

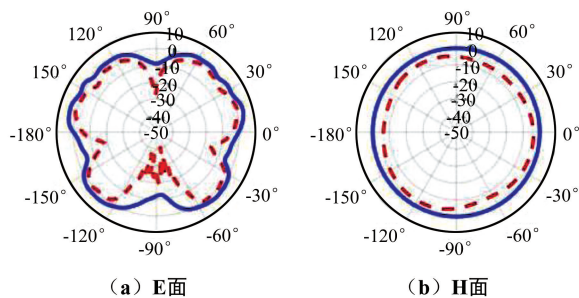


图 16 天线工作于 4.14 GHz 的 2D 方向图
Fig. 16 Antenna 2D radiation pattern at 4.14 GHz

为进一步验证本文所设计天线在实际工程应用中的综合性能优势,表 2 以参数对比的形式,系统梳理了本文天线与近年来国内外已有文献中 6 款典型同类天线在物理尺寸、工作带宽、天线增益指标上的差异,为性能优劣的量化评估提供直观依据。根据具体对比结果可从多维度展开分析。

表 2 天线性能对比

Tab. 2 Antenna performance comparison

文献	天线尺寸	工作频段/GHz	增益/dB
[2]	$0.72\lambda_0 \times 0.41\lambda_0 \times 0.55\lambda_0$	0.9~12	6~17
[4]	$0.45\lambda_0 \times 0.45\lambda_0 \times 0.18\lambda_0$	1.8~7.77	1
[5]	$0.033\lambda_0 \times 0.033\lambda_0 \times 0.023\lambda_0$	0.02~8	-48~8.13

续表

文献	天线尺寸	工作频段/GHz	增益/dB
[6]	$0.5\lambda_0 \times 0.5\lambda_0$	3.73~22.01	<2.12
[8]	$0.4\lambda_0 \times 0.4\lambda_0 \times 0.012\lambda_0$	3.44~3.56、 2.4~2.48、 5.11~5.37	0.65、0.05、0.95
[9]	$0.71\lambda_0 \times 0.71\lambda_0 \times 0.77\lambda_0$	2~18	0.45~4.85
本文	$0.09\lambda_0 \times 0.313\lambda_0 \times 0.0018\lambda_0$	0.7~0.91、 1.3~5.3	均>3

在工作带宽维度,相较于文献[8]中基于微带贴片结构设计的天线(其-10 dB 阻抗带宽仅覆盖 3.5~5.8 GHz),本文天线通过加载渐变开槽与寄生单元的复合结构,将-10 dB 阻抗带宽拓展至 0.7~6.0 GHz,不仅覆盖了 5G NR (3.3~3.6 GHz、4.8~5.0 GHz)、WiFi 6 (5.15~5.85 GHz) 等主流中高频通信频段,更实现了对传统蜂窝通信频段的兼容,在多频段协同工作场景中具备显著灵活性。而文献[2]采用的超材料加载天线与文献[5]提出的立体折叠式天线虽展现出更宽的带宽性能(分别达到 0.5~8.2 GHz、0.6~9.0 GHz),但其物理尺寸分别达到 80 mm×60 mm×15 mm 与 100 mm×75 mm×8 mm,远超紧凑型设备(如便携式无线电监测终端、微型基站)对天线“轻薄小”的集成要求,导致其仅能应用于基站天面、固定监测站等对尺寸无严格限制的场景,应用范围存在明显局限性。

在频段覆盖完整性维度,文献[4]基于缺陷地结构设计的天线、文献[6]的平面倒 F 天线(Planar Inverted-F Antenna, PIFA)及文献[9]的多枝节 monopole 天线,虽在中高频段(2.4~6.0 GHz)表现出稳定性能,但均未涵盖 0.7~0.96 GHz 这一关键低频段——该频段不仅包含 GSM 850/900(用于全球移动通信终端信号监测),还涉及短波广播、低轨卫星数据传输等无线电监测刚需场景,使得上述 3 款天线在全频段无线电监测任务中存在功能短板,难以满足复杂电磁环境下的多制式信号接收需求。

本文天线通过引入“低频短路枝节+高频耦合开槽”的一体化设计方案,在将天线整体尺寸控制为 45 mm×30 mm×1.6 mm(满足紧凑型设备的印制电路板集成标准)、实现小型化目标的同时,成功实现了 0.7~6.0 GHz 全频段的连续覆盖,既解决了传统宽频天线“宽频与小型化难以兼顾”的技术矛盾,又填补了同类天线在低频段无线电监测覆盖上的空白。综上,本文天线在宽频特性、尺寸兼容性与实用场景适配性上形成了均衡优势,为便携式无线电监测设备、多模通信终端等产品的天线集成提供了更优的技术方案。

4 结束语

本文提出了一款适用于无线电监测系统的小型化接收天线。该天线采用改进型偶极子结构,通过曲折化处理辐射臂实现天线小型化(38.6 mm×134.1 mm×0.8 mm),并引入寄生枝节以扩展带宽。实测与仿真结果吻合良好,天线在0.7~0.96 GHz与1.3~5.3 GHz双频段内有效工作。测试表明本文天线兼具高增益特性、结构小型化及低成本优势,可满足现代无线电监测系统对紧凑型天线的应用需求。



参考文献

- [1] ZHANG H, CHANG L, ZHANG A X. Extremely Low-profile Wideband Patch Antennas Using Electric- and Magnetic-coupling for 5G Mobile IoT Devices Application [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(9): 2698–2702.
- [2] SANTAMARIA L, FERRERO F, STARAJ R, et al. Slot-based Pattern Reconfigurable ESPAR Antenna for IoT Applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(7): 3635–3644.
- [3] WANG Z, DONG Y D. High-order-mode Antenna with Pattern Reconfigurability for Intelligent IoT Applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2025, 24(5): 1258–1262.
- [4] ABDALLAH M, FREUNDORFER A P, ANTAR Y M M. Planar Electrically Small Antenna with Omnidirectional Endfire Pattern for IoT Sensors [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2025, 24(8): 2372–2376.
- [5] ASHIKHMIN A V, GLOTOV V V, KOSTROVA V N, et al. Broadband Antennas for Portable Radio Monitoring Equipment [C] // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (Far-EastCon). Vladivostok: IEEE, 2020: 1–3.
- [6] 杨旭, 陈星. 轻量化小型宽带无人机载天线设计 [J]. *信息技术与信息化*, 2025(4): 103–106.
- [7] PENG J J, QU S W, XIA M Y, et al. Wide-scanning Conformal Phased Array Antenna for UAV Radar Based on Polyimide Film [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(9): 1581–1585.
- [8] 胡珺, 孙信群. 无线电监测宽带全向性天线研究与设计 [J]. *中国无线电*, 2022(9): 59–61.
- [9] 何佳, 胡稷鑫. 一种用于无线电监测的宽带天线仿真设计 [J]. *中国无线电*, 2014(10): 59–60.
- [10] WHITE C R, COLBURN J S, NAGELE R G. A Non-foster VHF Monopole Antenna [J]. *Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 584–587.
- [11] ZHANG H L, FU Z Z, HU B J, et al. Wideband Omnidirectional Antenna Featuring Small Azimuthal Gain Variation [J]. *Micromachines*, 2023, 14(12): 2218.
- [12] ZHANG Y, CHEN X, YAO J Q, et al. A Compact Ultra-wideband Receiving Antenna for Monitoring Applications [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2022, 64(1): 142–148.
- [13] GARG R K, SINGHAL S, NAIR M V D, et al. A Double-leaf-shaped Four-port MIMO Antenna for Ultra-wideband Applications [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2022, 32(11): e23349.
- [14] WANG L L, DU Z H, ZHANG Z H, et al. Dual-metasurface-based Wideband Antenna [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2022, 32(6): e23128.
- [15] 叶朝阳. 基于哑铃型缺陷地结构的多频微带贴片天线设计 [J]. *无线电工程*, 2024, 54(3): 704–710.
- [16] DUBROVKA F F, PILTYAY S, MOVCHAN M, et al. Ultrawideband Compact Lightweight Biconical Antenna with Capability of Various Polarizations Reception for Modern UAV Applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(4): 2922–2929.
- [17] POPELA M, VANĚK S, OLIVOVÁ J, et al. 3D Printing of a Patch Antenna for 5G Network and Radio Monitoring of UWB Signals [C] // 2023 International Conference on Military Technologies (ICMT). Brno: IEEE, 2023: 1–5.
- [18] CONSTANTINIDES, HARALAMBOUS H. A Compact Active Monitor Antenna for HF Spectral Occupancy Measurements [C] // 2022 3rd URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC). Gran Canaria: IEEE, 2022: 1–4.
- [19] WU D, SUN Y X, WANG B, et al. A Compact, Monostatic, Co-circularly Polarized Simultaneous Transmit and Receive (STAR) Antenna with High Isolation [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(7): 1127–1131.
- [20] CHEN J H, WEN M C, XUE J K, et al. UWB, Compact, Dual-polarized Antenna Designed by Tightly Coupling Technology [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2024, 66(10): e70002.

作者简介

王 彘 男, (1974—), 硕士, 高级工程师。

吴 丹 女, (1981—), 硕士, 高级工程师。

王 魁 男, (1991—), 工程师。主要研究方向: 卫星通信、微波散射通信、短波通信等。