

面向认知无线电应用的四端口 UWB-NB 天线设计

任林源¹
REN Linyuan

摘要

文章设计了一款面向认知无线电（cognitive radio, CR）系统的四端口 UWB-NB 天线，旨在通过动态频谱感知与多频段通信协同提升频谱资源利用率。该天线集成于 51 mm×51 mm×1 mm 的 FR-4 介质基板上（介电常数 4.4，损耗角正切 0.019），由 1 个超宽带（ultra-wide band, UWB）感知天线与 3 个窄带（narrow band, NB）通信天线构成。其中，UWB 天线完整覆盖美国联邦通信委员会（FCC）定义的 3.1~10.6 GHz 标准频段；3 个 NB 天线通过协同频段规划，分别覆盖低频（2.73~6.15 GHz）、中频（4.9~8.35 GHz）及高频（7.5~10.8 GHz），实现了对 UWB 频段的 100% 无缝覆盖。为突破多天线集成中的耦合瓶颈，创新性采用准自互补结构（quasi-self-complementary, QSC），在不依赖额外去耦措施的情况下，全频段内端口隔离度优于 15 dB。

关键词

认知无线电；窄带天线；超宽带；准自互补天线；隔离度

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.019

0 引言

认知无线电（cognitive radio, CR）技术由约瑟夫·米托拉（Joseph Mitola）于 1999 年提出，是提升频谱资源利用率的关键技术之一^[1]。其核心在于 CR 系统能够动态感知频谱使用状况，在不干扰授权用户的前提下，智能利用空闲频谱进行通信，从而实现频谱资源的高效利用^[2]。在 CR 系统中，天线作为信号收发的核心组件，需同时支持频谱感知和通信功能，因此通常需配备感知天线和通信天线^[3]。

近年来，面向认知无线电应用的双端口 UWB-NB 天线设计较为普遍，其中 UWB 天线用于频谱感知，NB 天线用于通信。然而，由于 NB 天线的带宽限制，单个 NB 天线难以完全覆盖 UWB 频段。为此，文献[4-5]提出了将多个 NB 天线与 UWB 天线集成的解决方案。例如，文献[5]在 30 mm×30 mm×1.6 mm 的 FR-4 介质基板上集成了 1 个 UWB 天线和 2 个 NB 天线，通过 2 个 NB 天线的协同工作覆盖了 UWB 频段的 22.4%。

然而，在有限空间内集成 UWB 天线与多个 NB 天线面临显著的技术挑战，主要源于天线间耦合效应导致的性能下降^[6]。为减少天线间的耦合，改善天线间的隔离度。天线设计者们提出了诸多解耦方法如：缺陷地结构^[7]、添加寄生枝节^[8]、引入中和线^[9]、使用准自互补结构^[10]等。例如文献[7]在接地板上蚀刻栅栏型解耦结构，延长了电

流耦合路径，使隔离度提升至 25 dB；文献[10]中由 4 个正交排列的准自互补（quasi-self-complementary, QSC）辐射单元组成的 UWB MIMO 天线，天线单元之间无需额外的去耦结构即可实现在工作频带内优于 20 dB 的高隔离度。

本文设计了一款面向 CR 应用的四端口 UWB-NB 天线。该天线集成于 51 mm×51 mm×1 mm 的 FR-4 介质基板上，由 1 个 UWB 感知天线和 3 个 NB 通信天线组成。其中，3 个 NB 天线的工作频段分别为低频（2.73~6.15 GHz）、中频（4.9~8.35 GHz）和 高频（7.5~10.8 GHz），实现了对 UWB 频段的 100% 全覆盖。为优化天线性能，采用准自互补结构（QSC），无须额外去耦措施即可在工作频段内实现优于 15 dB 的隔离度。

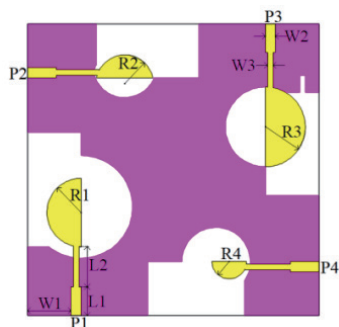
1 四端口 UWB 和 NB 天线设计

四端口 UWB-NB 天线打印在尺寸为 51 mm×51 mm×1 mm 的 FR-4 基板上。该基板的介电常数为 4.4，损耗角正切为 0.019。四端口天线以 4 元 UWB MIMO^[11] 天线为参考，保留 1 个 UWB 天线为感知天线，将其余 3 个 UWB 天线改进为 NB 通信天线。利用 CST 2019 仿真软件对该天线进行设计和改进。最终所得天线尺寸参数由表 1 所示，模型图如图 1 所示。对图 1 中位于 P1、P2、P3、P4 端口的天线分别命名为 Ant（P1）、Ant（P2）、Ant（P3）和 Ant（P4）。

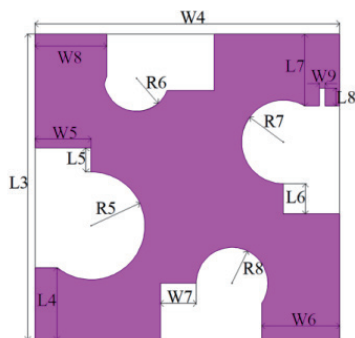
1. 武汉轻工大学电气与电子工程学院 湖北武汉 430023

表 1 天线结构各参数

Parameters	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	W1
Value /mm	5	7	51	12	4	5	12	3	7.6
Parameters	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	R1
Value /mm	1.8	1	51	9.4	13	6	12	1	6
Parameters	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8		
Value /mm	5	7	3	9	5.5	7	6		



(a) 顶部视图



(b) 底部视图

图 1 集成四端口 UWB-NB 天线的几何结构
(所有尺寸均以 mm 为单位)

由图 1 所示, 四端口天线中的 4 个天线单元结构皆是准自互补天线, 由于互补结构的辐射特性^[12], 仅须合理摆放各单元天线位置即可实现天线间的高隔离度, 从图 1 可见, 该天线通过将各天线单元正交摆放以实现各单元天线间的高隔离度。结果由 CST 2019 仿真所得图 2 中的 S 参数: S_{12} 、 S_{13} 、 S_{14} 、 S_{23} 、 S_{24} 和 S_{34} 所示, 各天线单元间的隔离度皆在 15 dB 以上。

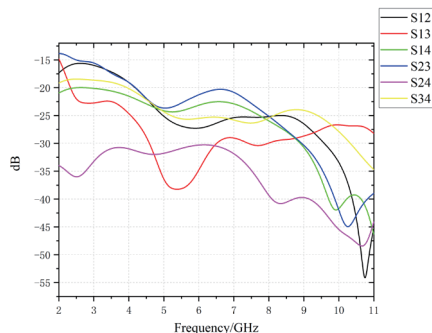


图 2 天线单元间 S 参数

1.1 UWB 感知天线设计

位于 P1 端口的 UWB 天线为准自互补天线, 由一个半圆的天线贴片和一个互补的切割平面构成。该 UWB 天线的半圆天线贴片 (R1) 的半径为 6 mm, 互补切割平面半圆 (R5) 的半径为 9 mm, 如图 3 所示。仿真所得参数 S_{11} 覆盖了频谱 3.0~11.0 GHz, 其中包括联邦通信委员会批准的完整免许可频谱 3.1~10.6 GHz, 如图 4 所示。UWB 天线在不同频率下的峰值增益由图 5 可见。

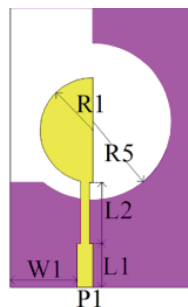


图 3 UWB 天线

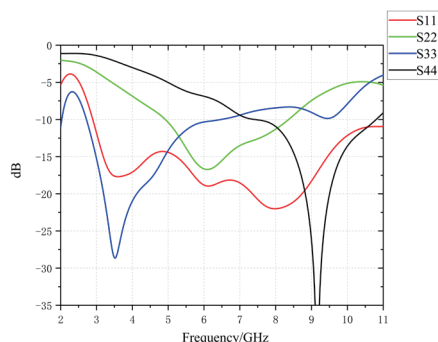


图 4 各天线的 S 参数

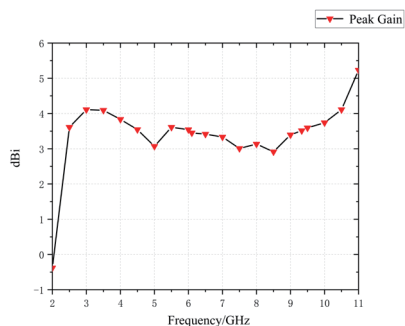


图 5 UWB 天线增益

1.2 NB 通信天线设计

由图 1 所见, 位于 P2 的 NB 天线 Ant (P2) 的天线贴片是半径为 5 mm 的半圆天线贴片 (R2) 裁剪 1 mm 的外圈圆弧, 互补切割平面是半径为 5.5 mm 的半圆 (R6) 裁剪 2 mm 的外圈圆弧。由 CST 2019 仿真所得 Ant (P2) 的工作频段覆盖了 UWB 频段的中频 4.9~8.35 GHz, 谐振频率为 6.1 GHz, 由图 4 所示。

Ant (P3) 的单极子贴片天线半圆 (R3) 半径为 7 mm, 互补切割半圆半径 (R7) 也为 7 mm, 结构由图 1 可见。值得注意的是, Ant (P3) 的互补切割平面切割了一块长 3 mm、宽 1 mm、厚 0.035 mm 的铜片, 切割位置由图 1 (b) 的底部视图可见。切割原因由天线仿真参数图 6 所示, 未切割前, 该天线覆盖了 UWB 中的低频 3.1~5.9 GHz 和高频 9.5~11 GHz。而切割后的 Ant (P3) 工作频段仅为 UWB 天线中的低频 2.73~6.15 GHz, 谐振频率为 3.5 GHz, 如图 4 所示。

位于 P4 端口的 NB 天线 Ant(P4) 结构如下: 单极子天线贴片半圆 (R4) 的半径为 3 mm, 互补切割平面的背板圆 (R8) 的半径大小为 6 mm, 由图 1 可见。由 CST 2019 仿真所得 Ant (P4) 的工作频段覆盖了 UWB 频段中的高频 7.5~10.8 GHz, 谐振频率为 9.2 GHz, 由图 4 可见。

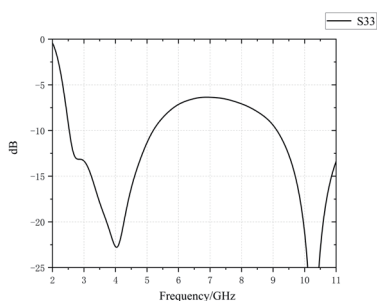
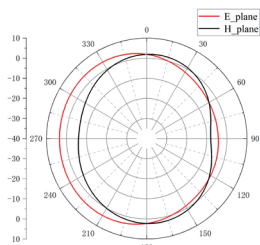


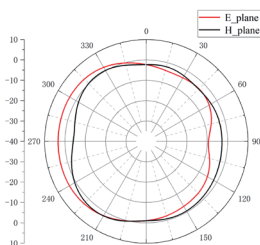
图 6 切割铜片前天线 Ant (P3) S 参数

2 结果分析

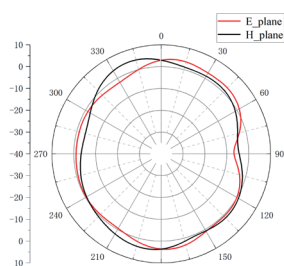
观察各天线的二维辐射方向图后, 发现所设计的 UWB 和 NB 天线皆为准全向天线。UWB 天线在谐振频率的二维辐射方向图如图 7 所示, 在 3.5 GHz、6.1 GHz 和 8.0 GHz 的 XOZ (E 面) 和 YOZ (H 面) 的辐射方向图均具有准全向辐射特性。UWB 天线在 3.5 GHz 的增益为 4.09 dBi, 6.1 GHz 的增益为 3.45 dBi, 8.0 GHz 的增益为 3.13 dBi。



(a) 3.5 GHz



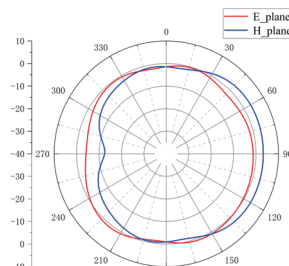
(b) 6.1 GHz



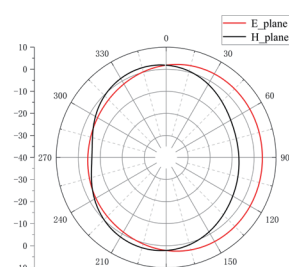
(c) 9.2 GHz

图 7 UWB 天线的二维辐射模式

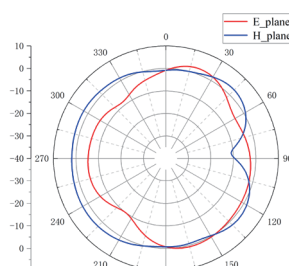
NB 天线的二维辐射方向图也和 UWB 天线类似, 具有准全向辐射特性, 仿真所得二维辐射方向图如图 8 所示, 展示了 (a) Ant (P2) 位于 6.1 GHz、(b) Ant (P3) 位于 3.5 GHz 和 (c) Ant (P4) 位于 9.2 GHz 的二维辐射方向图。Ant (P2) 在谐振频率 6.1 GHz 的增益为 4.1 dBi, Ant (P3) 在谐振频率 3.5 GHz 的增益为 3.9 dBi; Ant (P4) 在谐振频率 9.2 GHz 的增益为 3.5 dBi。



(a) Ant (P2) (6.1 GHz)



(b) Ant (P3) (3.5 GHz)



(c) Ant (P4) (9.2 GHz)

图 8 NB 天线的二维辐射模式

为展示本成果的先进性, 与已发表的类似成果进行了对比, 如表 2 所示, 本文所设计天线较为紧凑, 四端口天线

的尺寸为 51 mm×51 mm；感知天线和通信天线的工作频段 100%覆盖了 UWB 天线频段。

表 2 与已发表的类似成果对比

参考文献	天线尺寸 (mm×mm)	端口数	感知天线 频段 /GHz	通信天线 频段 /GHz	频段覆 盖率 /%
[5]	30×30	3	3.1~10.6	6.36~6.63 8.78~9.23 7.33~7.70 9.23~9.82	22.4
[13]	47×47	2	3.0~11	5.15~5.35	2.67
[14]	60×120	4	0.75~7.65	1.77~2.51	10
[15]	19×17.5	1	3.82~12	3.05~4.16 6.23~7.20 3.02~4.40	31.3
本文设计天线	51×51	4	2.9~10.8	4.90~8.35 2.73~6.15 7.50~10.8	100

3 结论

本文设计的新型四端口 UWB-NB 天线满足 CR 应用所需，拥有可用于感知的 UWB 天线和 3 个通信的 NB 天线，感知天线和通信天线的工作频段 100%覆盖了 UWB 天线频段，可以作为 CR 环境中频谱感知和通信的良好模块。在结构方面，为保证各天线单元间的高隔离度，各天线单元使用准自互补结构，无需其他去耦结构即可实现各天线单元在工作频段内优于 15 dB 的隔离度。

参考文献：

- [1] 曹华孝, 鲜永菊, 徐昌彪. 认知无线电技术的国内外发展与研究现状 [J]. 数字通信, 2009, 36(2): 51-57.
- [2] 陈兵, 胡峰, 朱琨. 认知无线电研究进展 [J]. 数据采集与处理, 2016, 31(3): 440-451.
- [3] PARIDA R K, ALMAWGANI A H M, MUDULI A, et al. A compact isolated CR antenna system for application in C-band[J]. International journal of antennas and propagation, 2024: 13.
- [4] PAHADISINGH S, SAHU S. Planar UWB integrated with multi narrowband cylindrical dielectric resonator antenna for cognitive radio application[J]. AEU-international journal of electronics and communications, 2017, 74: 150-157.
- [5] KUMAR N A, GANDHI A S. A compact novel three-port integrated wide and narrow band antennas system for cognitive radio applications[J]. International journal of antennas and propagation, 2016(1): 2829357.
- [6] NELLA A, GANDHI A S. A five-port integrated UWB and narrowband antennas system design for CR applications[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2018, 66(4): 1669-1676.
- [7] WANG L L, DD Z H, YANG H L, et al. Compact UWB MIMO antenna with high isolation using fence-type decoupling structure[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2019, 18(8): 1641-1645.
- [8] IQBAL A, SARAEREH O A, AHMAD A W, et al. Mutual coupling reduction using f-shaped stubs in UWB-MIMO antenna[J]. IEEE access, 2017, 6: 2755-2759.
- [9] ZHANG S, PEDERSEN G F. Mutual coupling reduction for UWB MIMO antennas with a wideband neutralization line[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2015, 15: 166-169.
- [10] ZHU J F, LI S F, FENG B T, et al. Compact dual-polarized UWB quasi-self-complementary MIMO/diversity antenna with band-rejection capability[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2015, 15: 905-908.
- [11] LIU X L, WANG Z D, YIN Y Z, et al. A compact ultrawide-band MIMO antenna using QSCA for high isolation[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2014, 13: 1497-1500.
- [12] 苏晋荣, 李艳玲. 利用科赫分形解耦的四端口紧凑型 QSC UWB MIMO 天线 [J]. 测试技术学报, 2023, 37(2): 170-177.
- [13] EBRAHIMI E, HALL P S. A dual port wide-narrowband antenna for cognitive radio[C]//2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2009: 809-812.
- [14] THUMMALURU S R, AMEEN M, CHAUDHARY R K. Four-port MIMO cognitive radio system for midband 5G applications[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2019, 67(8): 5634-5645.
- [15] LI L, JI H Y, NAN J C, et al. Broad-and narrow-band frequency reconfigurable antenna for cognitive radio application[C]//2022 IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). Piscataway: IEEE, 2022: 250-252.

【作者简介】

任林源（2000—），男，重庆开州人，硕士研究生，研究方向：天线设计。

（收稿日期：2025-02-10）