

文章编号: 1671-251X(2023)05-0127-06

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022090089

一种矿用高隔离度三频 MIMO 天线设计

董佩佩, 徐艳红, 王安义, 张志文, 白婷婷

(西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 多频多输入多输出(MIMO)天线由于空间受限,存在单元间距较小产生的强耦合问题。针对该问题,设计了一种矿用高隔离度三频 MIMO 天线。通过在1个矩形枝节两端加载2个L型枝节组成三叉戟单极子天线,使天线具有三频特性;将2个三叉戟单极子天线单元对称放置,在2个单元之间的金属地板上加载1个T型枝节,利用寄生枝节产生的相反电流抵消未加枝节时耦合产生的电流,并蚀刻2个对称的矩形槽,通过改变地板上的电流分布来抑制地板表面波带来的互耦,从而使天线在整个频段内实现高隔离度。仿真结果表明:该天线工作在1.85~2.70, 3.24~3.99, 4.65~5.80 GHz频段,能有效覆盖煤矿井下WiMAX/WiFi/4G/5G NR工作频段;天线在3个频段内的隔离度分别大于20, 22, 22 dB,较去耦合前天线的隔离度分别提高了11, 9, 10 dB;包络相关系数小于0.2,具有良好的分集性能;天线在工作频段内增益变化稳定,且全向辐射特性良好。该天线具有结构简单紧凑、易加工、剖面低的优势,在煤矿无线通信中具有广泛的应用场景。

关键词: 煤矿通信; MIMO 天线; 高隔离度; 三频段; 单极子天线

中图分类号: TD655.3

文献标志码: A

Design of a mine high isolation tri-band MIMO antenna

DONG Peipei, XU Yanhong, WANG Anyi, ZHANG Zhiwen, BAI Tingting

(College of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology,
Xi'an 710054, China)

Abstract: Due to space limitations, multi frequency multiple-input multiple-output (MIMO) antennas have strong coupling problems caused by small unit spacing. In order to solve the above problems, a mine high isolation tri-band MIMO antenna has been designed. By loading two L-shaped branches at both ends of a rectangular branch to form a trident monopole antenna, the antenna has tri-band features. Two trident monopole antenna units are placed symmetrically. A T-shaped branch is loaded on the metal floor between the two units. The opposite current generated by parasitic branches is used to offset the coupling current without branches. Two symmetrical rectangular slots are etched to suppress the mutual coupling caused by surface waves on the floor by changing the current distribution on the floor. The high isolation of the antenna throughout the entire band is achieved. The simulation results show that the antenna operates in frequency bands of 1.85-2.70, 3.24-3.99, 4.65-5.80 GHz, can effectively covering coal mines' underground WiMAX/WiFi/4G/5G NR operating band. The isolation of the antenna in three bands is greater than 20, 22, 22 dB, respectively. It is 11, 9, 10 dB higher than the isolation of the antenna before decoupling; The envelope correlation coefficient is less than 0.2, indicating good diversity performance. The antenna has stable gain variation within the operating band and good omnidirectional radiation features. This antenna has the advantages of simple and compact structure, easy processing, and low profile. It has a wide range of application scenarios in wireless communication in coal mines.

收稿日期: 2022-09-29; 修回日期: 2023-05-18; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61901357, 62271386, U19B2015); 陕西省教育厅自然科学专项项目(21JK0774)。

作者简介: 董佩佩(1998—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要研究方向为矿用天线设计, E-mail: N17407111311@163.com。

引用格式: 董佩佩, 徐艳红, 王安义, 等. 一种矿用高隔离度三频 MIMO 天线设计[J]. 工矿自动化, 2023, 49(5): 127-132.

DONG Peipei, XU Yanhong, WANG Anyi, et al. Design of a mine high isolation tri-band MIMO antenna[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(5): 127-132.



扫码移动阅读

Key words: coal mine communication; MIMO antenna; high isolation; tri-band; monopole antenna

0 引言

随着煤矿信息化与智能化的发展,煤矿通信系统对数据传输速率、信道容量及传输可靠性提出越来越高的要求^[1-2]。多频多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)天线技术不仅可以提高通信系统的频谱利用率、信道容量及可靠性^[3],还能在一定程度上缓解井下严重的多径衰落问题。然而,由于空间受限,多频 MIMO 天线单元间距较小,单元间耦合较强,信号干扰严重。因此,如何提高多频 MIMO 天线单元之间的隔离度成为研究人员广泛关注的问题。

目前,降低 MIMO 天线单元间耦合的方法有去耦网络法^[4-6]、中和线法^[7-9]、分集技术法^[10]、超材料结构法^[11-12]、缺陷地结构法^[13-14]和寄生谐振结构法^[15-18]等。去耦网络法是通过在天线的馈电端口添加网络来吸收馈电端口向外辐射的电磁波,使其无法传输到相邻的端口,从而减少天线单元间的耦合^[6],但该网络会引起天线单元输入阻抗失配,需要重新进行阻抗匹配。中和线法是利用 1 条金属微带线在合适位置将相邻 2 个天线单元连接,使得单元间产生 1 条与激励单元电流相抵消的路径,从而降低单元间的耦合,提升隔离度^[9],但该方法不仅占用的系统空间大,还会对天线的近场辐射产生一定干扰。分集技术法是一种自解耦方法,无需增加附加的去耦结构,在特定的散射条件下能有效增加信道容量,但该方法在使用上具有一定局限性。超材料结构法通常是通过在介质基板上印制周期排列的金属单元实现阻带特性,从而减少天线单元之间的耦合,但该方法会提高天线的剖面,且设计结构复杂。缺陷地结构法是通过在地板上蚀刻不同形状的槽状结构实现带阻效果,从而抑制地板表面波带来的耦合,具有加工简单的优点,但该方法可能会引起天线方向图的变化和辐射效率的降低。寄生谐振结构法是通过在 2 个强耦合的天线之间增加寄生单元或地板枝节,使得引入的新耦合路径与原耦合路径叠加抵消,从而有效减少耦合,该方法适用性强,解耦效果好,且制作成本低,但对于天线实现小型化具有一定难度。

本文结合缺陷地结构法和寄生谐振结构法的优点,设计了一种矿用高隔离度三频 MIMO 天线。在矩形枝节的两端加载 2 个 L 型枝节形成三叉戟单极子天线,使天线具有三频特性,满足能有效覆盖煤矿

井下商用 5G NR 频段(2.51~2.67, 3.40~3.60, 4.80~4.90 GHz)、4G 频段(1.88~2.66 GHz)、WiFi 频段(2.40~2.48 GHz)和 WiMAX 频段(2.50~2.69 GHz)的要求;在地板上加载 T 型枝节和蚀刻矩形槽,使天线能在整个频段内实现高隔离度。

1 天线设计

1.1 整体结构

矿用高隔离度三频 MIMO 天线由介质基板、辐射单元、金属地板和去耦合结构组成,如图 1 所示。介质基板采用 FR4 材料(相对介电常数为 4.4,损耗角正切为 0.02),尺寸为 $G \times G \times H$ (长×宽×高),其上表面印制 2 个对称放置的辐射单元,该辐射单元由三叉戟单极子天线(在 1 个矩形枝节两端加载 2 个 L 型枝节)、阻抗变换器和微带线组成,下表面覆有 $G \times G_1$ (长×宽)的金属地板,在地板上加载 1 个 T 型枝节并蚀刻 2 个对称的矩形槽,构成去耦合结构。天线采用 50 Ω 微带线馈电,尺寸为 $G \times G$ (长×宽)。 L_1 — L_{11} 为天线各枝节的长度, W_1 为 T 型枝节、矩形槽和阻抗变换器的宽度, W_2 为微带线的宽度, L_{12} 为矩形槽的长度, d 为矩形槽至 T 型枝节的水平距离。

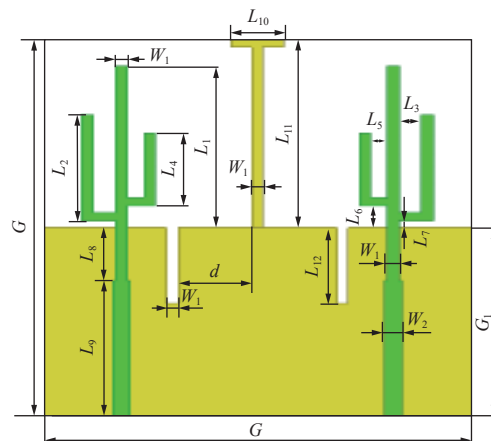


图 1 矿用高隔离度三频 MIMO 天线结构

Fig. 1 Structure of mine high isolation tri-band MIMO antenna

矿用高隔离度三频 MIMO 天线参数见表 1。

1.2 设计过程

理论上,长度约为 $\lambda_g/4$ (λ_g 为天线辐射的电磁波在介质中的波长)的单极子天线具有较好的辐射特性,且其输入阻抗接近 50 Ω ,易于馈线匹配。波长计算公式为

$$\lambda = c/f \quad (1)$$

$$\lambda_g = \lambda/\sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

式中: λ 为天线辐射的电磁波在真空中的波长; c 为光

表 1 矿用高隔离度三频 MIMO 天线参数
Table 1 Parameters of mine high isolation tri-band

MIMO antenna									mm
参数	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9
值	21.5	14	2	9.5	1.5	3	1	7	18
参数	L_{10}	L_{11}	L_{12}	d	W_1	W_2	G	H	G_1
值	4.7	25	10	7	1	1.5	50	0.8	25

速; f 为天线频率; ϵ_r 为介质基板的相对介电常数。

根据式(1)~式(2)可得三叉戟单极子天线在介质基板中谐振的初始长度,通过 Ansoft HFSS 电磁仿真软件对天线进行建模和参数扫描优化,从而使得天线工作在所需的 3 个频段。对称放置 2 个三叉戟单极子天线,得到天线 1(图 2(a)),单元间距为 $0.18\lambda_1$ (λ_1 为天线辐射的电磁波在低频段中心频点 2.3 GHz 处的波长)。由于天线单元间距较小,单元之间存在较强的耦合。为了降低单元之间的强耦合,提高天线的隔离度,先在 2 个单元之间的地板上加载 1 个 T 型枝节,得到天线 2(图 2(b)),利用寄生枝节产生的相反电流抵消未加枝节时耦合产生的电流;在地板上刻蚀 2 个对称的矩形槽,得到天线 3(图 2(c)),通过调整矩形槽的尺寸,改变 2 个单元间地板上的电流分布,抑制地板表面波带来的互耦。天线设计过程如图 2 所示。

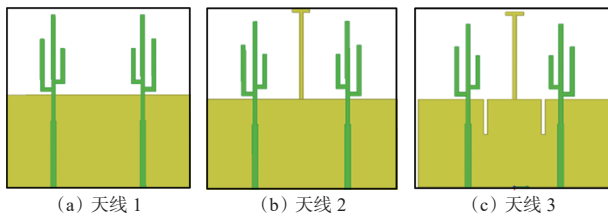


图 2 天线设计过程

Fig. 2 Design procedures of antenna

T 型枝节和矩形槽去耦合原理如图 3 所示,即利用去耦合结构产生的间接耦合电流来抵消未加去耦合结构时产生的直接耦合电流。当单元 1 受到电流 I 激励时,单元 1 对单元 2 产生的直接耦合电流为 aI (a 为耦合因数)。引入去耦合结构后,单元 1 在 T 型枝节和矩形槽上产生的耦合电流分别为 bI 和 cI (b 和 c 为耦合因数),T 型枝节和矩形槽在单元 2 上产生的间接耦合电流分别为 b^2I 和 c^2I 。因此,单元 2 上产生的总耦合电流为 $aI+b^2I+c^2I$ 。通过适当调整 T 型枝节和矩形槽的尺寸,可以改变耦合因数 b 和 c ,使单元 2 上的总耦合电流趋近于 0,从而减小单元间的耦合。

天线设计过程对应的传输系数 S_{21} 曲线如图 4 所示。可看出:未加去耦合结构的在天线 1 在 1.85~

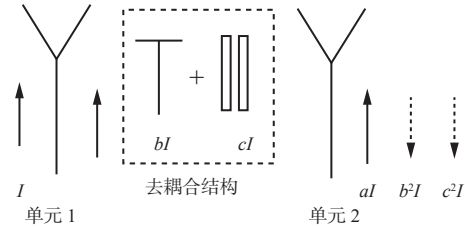


图 3 T 型枝节和矩形槽去耦合原理

Fig. 3 Decoupling principle of T-shaped branch and rectangular slots

2.70, 3.24~3.99, 4.65~5.80 GHz 3 个频段内的隔离度(即 S_{21} 值的相反数)分别大于 9, 13, 12 dB; 加载 T 型枝节后的天线 2 在 3 个频段内的隔离度分别大于 10, 17, 22 dB; 加载 T 型枝节并蚀刻矩形槽后的天线 3 在 3 个频段内的隔离度分别大于 20, 22, 22 dB。由此可见,T 型枝节主要改善了中频段和高频段的的天线隔离度,矩形槽主要改善了低频段和中频段的的天线隔离度,最终使得天线 3 的隔离度较去耦合前的天线 1 分别提高了 11, 9, 10 dB。

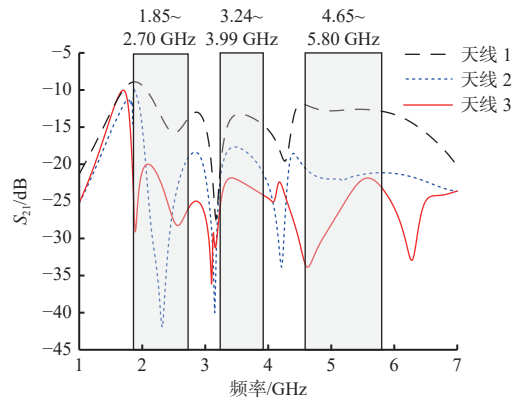


图 4 天线的 S_{21} 曲线

Fig. 4 S_{21} curve of antenna

为进一步验证去耦合结构的有效性,给出天线在 2.5, 3.4, 5.3 GHz 处工作时加入去耦合结构前后的电流分布,如图 5 所示(以左端口为激励端口,右端口接匹配负载)。可看出:加入去耦合结构前,由于激励天线对非激励天线的耦合作用,右端非激励天线单元存在大量耦合电流;加入去耦合结构后,耦合电流主要集中在 T 型枝节和矩形槽附近,非激励天线单元表面电流明显减弱。这表明去耦合结构的存在大大提高了天线单元间的隔离度。

2 仿真分析

利用 Ansoft HFSS 电磁仿真软件对本文设计的天线进行性能分析。天线 S 参数曲线如图 6 所示(S_{11} 为反射系数)。可看出天线工作在 1.85~2.70, 3.24~3.99, 4.65~5.80 GHz 3 个频段时相对带宽分别为 37.4%, 20.7%, 22%, 能有效覆盖煤矿井下 WiMAX/

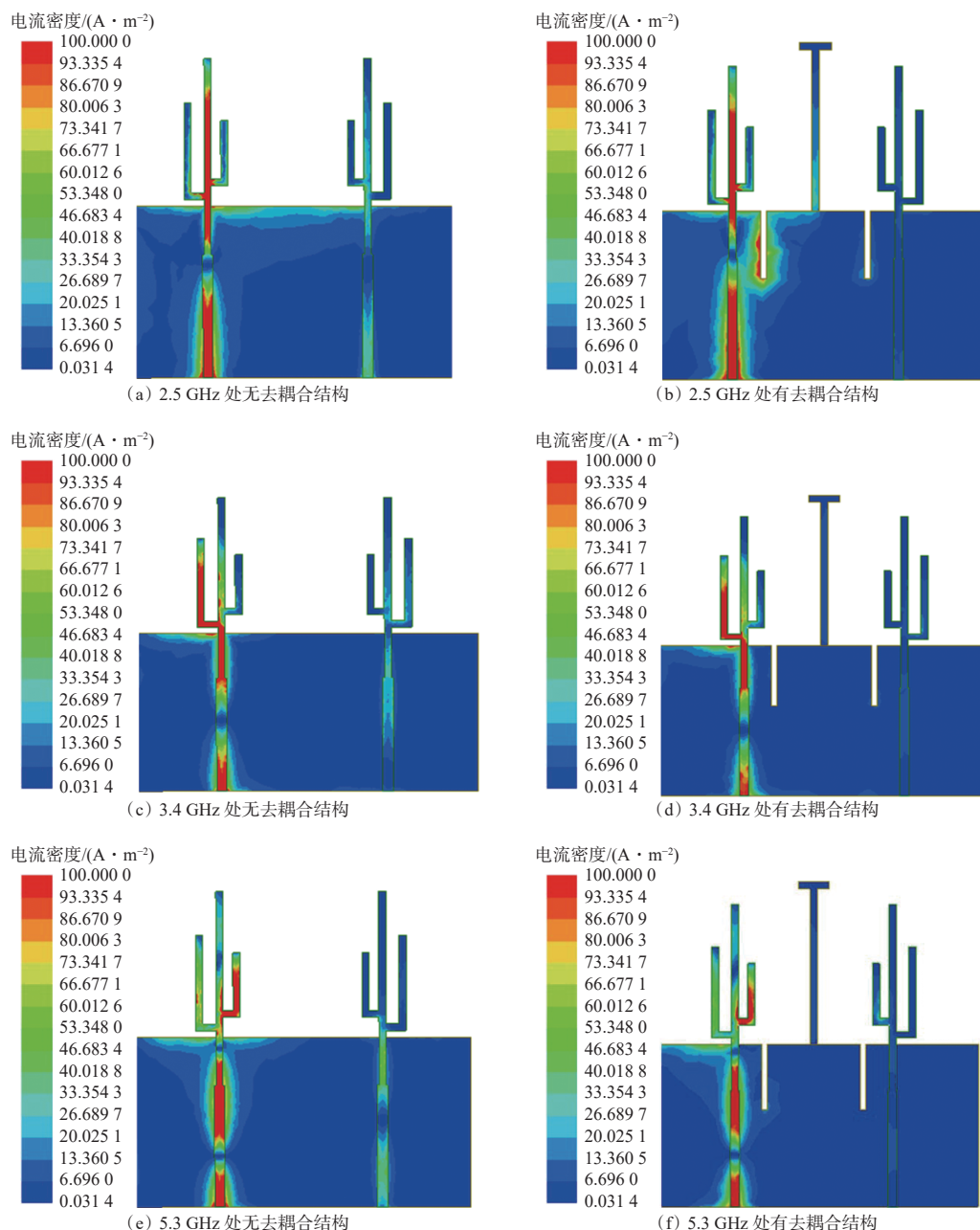


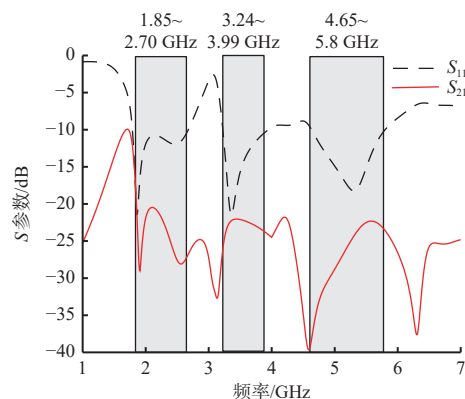
图 5 加入去耦合结构前后天线电流分布对比

Fig. 5 Comparison of antenna current distribution before and after adding decoupling structure

WiFi/4G/5G NR 的工作频段,且在 3 个工作频段内,该天线隔离度分别大于 20, 22, 22 dB, 隔离特性好。

天线增益如图 7 所示。可看出天线在 1.85~2.70, 3.24~3.99, 4.65~5.80 GHz 3 个频段的增益分别为 4.12~4.80, 3.85~4.02, 3.75~4.22 dBi, 增益变化稳定,且符合单极子天线增益大于 2 dBi 的基本要求。

天线的包络相关系数 (Envelope Correlation Coefficient, ECC) 如图 8 所示。可看出天线的 2 个端口之间的 ECC 在 3 个频段均低于 0.2, 表明 2 个天线单元有较低的相关性和良好的分集性能,能够很好地满足 MIMO 天线 ECC 小于 0.5 的设计要求。

图 6 天线 S 参数曲线Fig. 6 S parameter curves of antenna

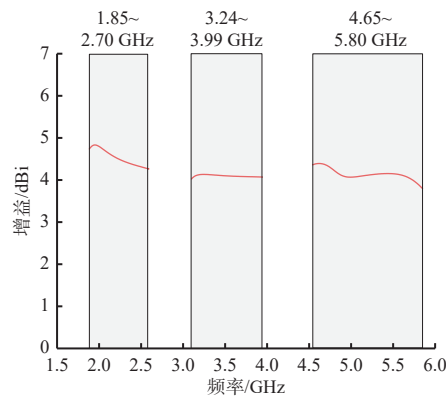


图7 天线增益曲线

Fig. 7 Gain curve of antenna

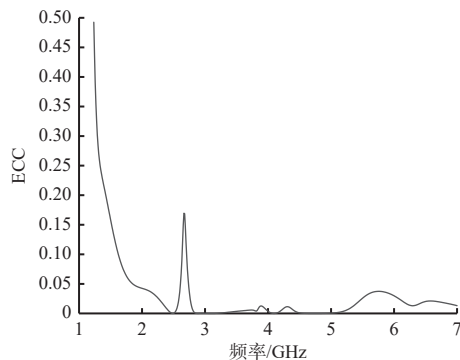


图8 天线ECC曲线

Fig. 8 Envelope correlation coefficient curve of antenna

天线在 2.5、3.4、5.3 GHz 的辐射方向如图 9 所示。可看出随着频率的增加,方向图发生了轻微的变化,E 面方向图大致呈“8”字形,H 面方向图呈“O”字形,呈现全向辐射特性,与理想单极子天线辐射特性有较好的一致性。

为了更好地体现本文所设计天线的性能,选取文献[19-21]中的天线并分别从单元间距、工作频段、相对带宽、隔离度等方面进行比较,见表 2。可看出本文设计的天线能够在结构小且紧凑的空间内分别在 3 个工作频段上实现较宽的相对带宽和较高的隔离度。

3 结语

设计了一种具有高隔离特性的三频 MIMO 天线。通过 1 个矩形枝节加载 2 个 L 型枝节组成的三叉戟单极子天线,实现了天线的三频工作特性;通过在 2 个对称放置的三叉戟单极子天线单元间的地板上加载 T 型枝节和蚀刻 2 个对称的矩形槽,提高了天线的隔离度。仿真结果表明:该天线工作在 1.85~2.70、3.24~3.99、4.65~5.80 GHz 3 个频段,能够有效覆盖煤矿井下 WiMAX/WiFi/4G/5G NR 工作频段;天线在 3 个频段内的隔离度分别大于 20、22、

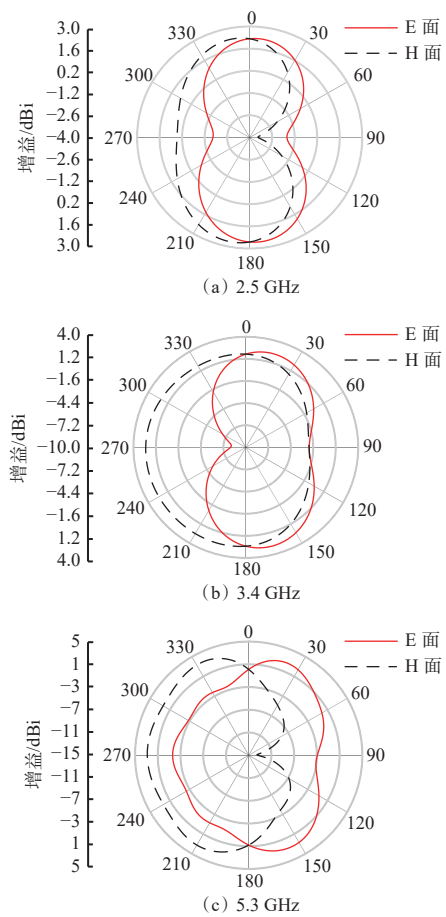


图9 天线辐射方向

Fig. 9 Antenna radiation direction

表2 天线性能对比

天线	单元间距/mm	工作频段/GHz	相对带宽/%	隔离度/dB
文献[19]	0.20λ ₁	2.40~2.48	3.3	>16
		5.15~5.83	12.4	
文献[20]	0.40λ ₁	3.3~3.6	8.7	>15
		4.8~5.0	4.1	
文献[21]	0.2λ ₁	3.4~3.6	5.7	>17
		1.85~2.70	37.4	
本文	0.18λ ₁	3.24~3.99	20.7	>20
		4.65~5.80	22.0	

22 dB, 隔离性能好; ECC 小于 0.2, 具有良好的分集性能;增益变化稳定;全向辐射特性较好。该天线具有结构简单紧凑、易加工、剖面低等优势,在煤矿无线通信中具有广泛的应用场景。

参考文献(References):

[1] 张志文, 徐艳红, 周梦丽, 等. 矿用多频段微带天线设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(7): 125-129.
ZHANG Zhiwen, XU Yanhong, ZHOU Mengli, et al. Design of multi-band microstrip antenna[J]. Journal of

- Mine Automation, 2022, 48(7): 125-129.
- [2] 霍羽, 张毅, 徐钊, 等. 煤矿井巷自适应多天线理论与关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2017, 43(10): 48-53.
HUO Yu, ZHANG Yi, XU Zhao, et al. Theory and key technologies research on adaptive multi-antenna in coal mine tunnel[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(10): 48-53.
 - [3] RAMACHANDRAN A, MATHEW S, RAJAN V, et al. A compact triband quad-element MIMO antenna using SRR ring for high isolation[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16(99): 1409-1412.
 - [4] SUI Jiangwei, HUANG Cuixia, CHENG Yifeng. Multi-element fully-decoupled inverted-F antennas for mobile terminals[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(11): 10076-10085.
 - [5] SONG Simin, CHEN Xiaoming, DA Yiran, et al. Broadband dielectric resonator antenna array with enhancement of isolation and front-to-back ratio for MIMO application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(7): 1487-1491.
 - [6] CHEN S C, WANG Y S, CHUNG S J, et al. A decoupling technique for increasing the port isolation between two strongly coupled antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(12): 3650-3658.
 - [7] 高振斌, 安星. 三频段MIMO天线的双中和线去耦合设计[J]. 河北工业大学学报, 2020, 49(4): 47-53, 82.
GAO Zhenbin, AN Xing. Double neutralization lines decoupling design for tri-band MIMO antenna[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2020, 49(4): 47-53, 82.
 - [8] SU S W, LEE C T, CHANG F S. Printed MIMO-antenna system using neutralization-line technique for wireless USB-dongle applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 456-463.
 - [9] ZHANG Shuai, PEDERSEN G F. Mutual coupling reduction for UWB MIMO antennas with a wideband neutralization line[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 166-169.
 - [10] CAPOBIANCO A D, PIGOZZO F M, ASSALINI A, et al. A compact MIMO array of planar end-fire antennas for WLAN applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(9): 3462-3465.
 - [11] LIU Feng, GUO Jiayin, ZHAO Luyu, et al. A meta-surface decoupling method for two linear polarized antenna arrays in sub-6 GHz base station applications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 2759-2768.
 - [12] WANG Ziyang, ZHAO Luyu, CAI Yuanming, et al. A meta-surface antenna array decoupling (MAAD) method for mutual coupling reduction in a MIMO antenna system[J]. Scientific Reports, 2018, 8(3152): 1-9.
 - [13] 南敬昌, 潘俊汝, 高明明, 等. 具有高隔离度的紧凑型三陷波UWB-MIMO天线设计[J/OL]. 电波科学学报: 1-10[2023-05-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1185.TN.20230104.1638.002.html>.
 - NAN Jingchang, PAN Junru, GAO Mingming, et al. Compact triple trap UWB-MIMO antenna design with high isolation[J/OL]. Chinese Journal of Radio Science: 1-10[2023-05-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1185.TN.20230104.1638.002.html>.
 - [14] IKRAM M, NGUYEN-TRONG N, ABBOSH A M. Realization of a tapered slot array as both decoupling and radiating structure for 4G/5G wireless devices[J]. IEEE Access, 2019, 7: 159112-159118.
 - [15] 王再跃, 汪建安, 安凯, 等. 一种基于寄生单元结构的高隔离度MIMO天线[J]. 电子制作, 2023, 31(2): 75-77, 119.
WANG Zaiyue, WANG Jian'an, AN Kai, et al. A high isolation MIMO antenna based on parasitic element structure[J]. Practical Electronics, 2023, 31(2): 75-77, 119.
 - [16] 黄涛, 杨雪霞. 一种结构紧凑的高隔离度MIMO天线[J/OL]. 无线电工程: 1-7[2023-05-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1097.TN.20230424.1756.026.html>.
HUANG Tao, YANG Xuexia. A compact MIMO antenna with high isolation[J/OL]. Radio Engineering: 1-7[2023-05-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1097.TN.20230424.1756.026.html>.
 - [17] 王鹏, 程号迪, 韩国瑞. 应用于5G的高隔离双频MIMO天线设计[J]. 测试技术学报, 2023, 37(2): 165-169, 184.
WANG Peng, CHENG Haodi, HAN Guorui. Design of high isolation dual-band MIMO antenna for 5G[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(2): 165-169, 184.
 - [18] NIU Zicheng, ZHANG Hou, CHEN Qiang, et al. Isolation enhancement in closely coupled dual-band MIMO patch antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(8): 1686-1690.
 - [19] SU S W, LEE C T, HSIAO Y W. Compact two-inverted-F-antenna system with highly integrated π -shaped decoupling structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(9): 6182-6186.
 - [20] 虞成城, 任周游, 赵安平. 一种用于5G移动通信终端的双频MIMO天线系统[J]. 微波学报, 2019, 35(6): 40-44.
YU Chengcheng, REN Zhouyou, ZHAO Anping. A dual-band MIMO antenna system for 5G mobile terminals[J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(6): 40-44.
 - [21] REN Zhouyou, ZHAO Anping, WU Shengjie. MIMO antenna with compact decoupled antenna pairs for 5G mobile terminals[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(7): 1367-1371.