

基于高输入阻抗偶极子的低剖面宽带 双极化基站天线

黄河, 马瑞华

(西安电子科技大学空间科学与技术学院, 陕西西安 710126)

摘要: 本文提出了一种低剖面的宽带双极化基站天线。该天线由两个相互交叉的扇形偶极子演变而来。首先, 在扇形偶极子末端增加环形窄微带和金属化通孔, 使天线端口输入阻抗增大, 达到降低天线高度的目的。然后, 增大扇形偶极子臂的张角, 产生第二谐振点, 提高天线带宽。该双极化天线工作在 2.17~2.7 GHz 频段, 可提供 22% 的带宽。而且, 由于两个偶极子围绕几何中心高度对称, 该天线在工作频带内可以获得较高的隔离度和交叉极化鉴别度, 其中隔离度仿真值可达 51 dB, 0° 交叉极化鉴别度仿真值可达 48 dB。该天线的峰值增益仿真值高达 9.6 dBi。综上所述, 该天线具有高隔离、高交叉极化鉴别度和高增益等优点, 在基站系统中具有良好的应用前景。

关键词: 基站天线; 双极化天线; 偶极子天线; 输入阻抗; 低剖面天线; 宽带天线

基金项目: 国家自然科学基金(No.61901321); 陕西省创新能力支撑计划(No.S2022-ZC-TD-0060)

中图分类号: TN821+.4; TN828.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2024)07-2300-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240018

A Low Profile, Wideband and Dual-Polarized Base Station Antenna Based on the Dipole with High Input Impedance

HUANG He, MA Rui-hua

(School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710126, China)

Abstract: In this paper, a wideband, dual-polarized antenna with extremely low profile is developed for base station application. The antenna evolved from two fan-shaped dipoles that crossed each other. By adding annular branches and metallized through holes at the end of the dipole, its port input impedance increases when the antenna occupies a lower height. Besides, the flare angle of the fan-shaped arm is increased so that a second resonant point can be generated to achieve the purpose of expanding the bandwidth. The dual-polarized antenna can provide a bandwidth of 22% in the 2.17~2.7 GHz band. Because the two dipoles is highly symmetrical about the geometric center, the isolation degree and cross polarization discrimination are high in the working frequency band, among which the simulation value of the isolation degree can reach 51 dB, and the simulation value of the cross polarization discrimination in the 0° can reach 48 dB. In addition, the simulated peak gain of the antenna is as high as 9.6 dBi. The antenna has the advantages of high isolation, high cross-polarization discrimination and high gain, and has a good application prospect in the base station system.

Key words: base station; dual-polarized antenna; dipole antenna; input impedance; low profile antenna; wideband antenna

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61901321); Innovation Capability Support Program of Shaanxi (No.S2022-ZC-TD-0060)

1 引言

基站天线的主要功能是提供无线覆盖, 即实现有线通信网络与无线终端之间的无线信号传输。基站天线的极化方式大多为双极化, 通过利用两个天线的极

化正交性, 可以得到两个不相干的快衰落信号, 从而获得分集增益。常见的双极化基站天线通常包含两个相互交叉的、放置于金属反射板上方的偶极子, 每个偶极子的长度约为 0.5λ (λ 为工作频带中心频率对应的自由

空间波长)。这两个偶极子与金属反射板之间的距离通常设置为 $0.25\lambda^{[1-3]}$, 以确保主辐射方向上的增益最大。

另一方面, 第二代至第五代通信系统的长期共存, 对基站天线的尺寸提出了更严格的要求, 尤其是外形(高度)方面。以中心频率为 2.45 GHz 的基站天线为例, 偶极子与金属反射板之间的距离应为 30 mm。显然, 该数值并不符合基站天线低剖面的要求。因此, 研究人员提出使用人工磁导体代替金属反射板, 以降低天线的高度^[4-8]。这种方法需要分别设计偶极子和人工磁导体, 然后将它们组装在一起进行联合仿真, 设计过程稍显复杂。

另一种降低天线高度的方法是使用微带贴片作为辐射体。例如, 在文献[9]中, 由 L 形探针馈电的方形贴片天线, 其高度为 0.13λ 。在文献[10]中, 由耦合槽馈电的贴片天线, 其高度为 0.04λ 。文献[11, 12]中, 也采用了类似的方法获得了低剖面定向天线。除了上述两种

方法, 研究人员还提出了采用半尺寸全波偶极子来降低天线高度的方法。这种方法是受到文献[13]中关于放置在反射器上方的水平半波偶极子输入阻抗讨论的启发。如文献[13]所述, 随着偶极子与反射板之间的距离减小, 天线端口输入阻抗急剧下降。为了在天线高度降低时获得良好的阻抗匹配, 文献[14]将原始的半波偶极子替换为具有高输入阻抗的全波偶极子。类似的研究也出现在文献[15]中。基于上述研究, 本文提出了一种低剖面、宽带和双极化的基站天线。在天线高度为 11.4 mm (0.09λ) 的情况下, 仅通过天线本身的结构设计, 就可以在 2.17~2.7 GHz 频段内实现阻抗匹配。该天线具有尺寸小、易于加工和辐射方向图稳定的优点。表 1 中列出了本文提出的天线与参考文献中的天线在各方面的对比, 更深入地了解每种方法的优势和局限性, 并根据其特定应用做出合理的选择。

表 1 各天线性能对比

参考文献	实现低剖面的方法	工作频率	天线电的尺寸	极化方式	增益仿真峰值/dBi
文献[4]	人工磁导体反射板	4.77~7.12 GHz	$0.74 \times 0.54 \times 0.12\lambda^3$	单极化	9.9
文献[5]	人工磁导体反射板	3.30~5.00 GHz	$0.40 \times 0.40 \times 0.12\lambda^3$	双极化	10.4
文献[11]	贴片天线	3.30~3.60 GHz	$0.29 \times 0.29 \times 0.06\lambda^3$	双极化	8.5
文献[12]	贴片天线	3.40~3.60 GHz	$0.26 \times 0.26 \times 0.06\lambda^3$	双极化	8.5
文献[13]	多辐射臂	279.50 MHz	$0.466 \times 0.075 \times 0.023\lambda^3$	单极化	8.7
文献[14]	全波偶极子	2.00~2.70 GHz	$1.16 \times 1.16 \times 0.008\lambda^3$	双极化	11.7
文献[15]	折叠偶极子	1.18~4.08 GHz	$0.78 \times 0.78 \times 0.10\lambda^3$	单极化	10.5
本文	折叠偶极子	2.17~2.70 GHz	$0.40 \times 0.40 \times 0.09\lambda^3$	双极化	9.6

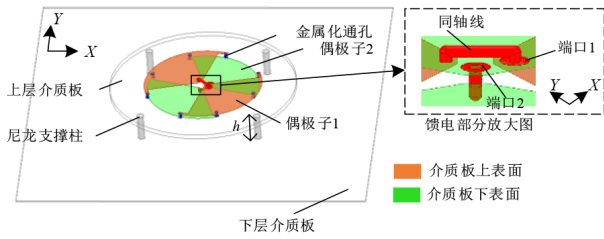
2 天线结构

图 1(a) 给出了天线的结构示意图。该天线由上层介质板、下层介质板和尼龙支撑柱组成。上层介质板和下层介质板之间的距离, 即尼龙支撑柱的高度为 9 mm。上层介质板的相对介电常数为 4.4, 厚度为 2 mm, 半径为 40 mm; 下层介质板的相对介电常数为 4.4, 厚度为 0.4 mm, 边长为 150 mm。偶极子 1 印刷在上层介质板的上表面, 偶极子 2 印刷在上层介质板的下表面。馈电时, 同轴电缆的内部芯线连接到偶极子的一条臂上, 外部芯线连接到偶极子的另一条臂上。偶极子 1 对应的端口表示为端口 1, 偶极子 2 对应的端口表示为端口 2。在下层介质板的上表面还印刷有一个与下层介质板同等大小的金属贴片, 用来形成定向辐射。

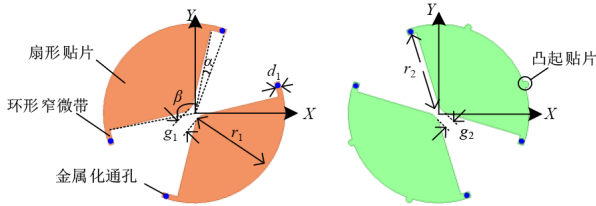
偶极子 1 和偶极子 2 的结构与常规偶极子不同。如图 1(b) 所示, 偶极子 1 具有两个对称于坐标原点的辐射臂, 这两个臂之间的距离为 3.6 mm (g_1)。每个辐射臂包含一个扇形贴片、环形窄微带和金属化通孔。扇形贴片的半径为 r_1 , 其张角为 β 。扇形贴片的大张角有利于形

成宽带覆盖。在扇形贴片的末端, 沿弧长方向延伸出一个张角为 α 的环形窄微带, 环形窄微带的宽度为 d_1 。然后在每个环形窄微带的末端设置有一个直径略小于环形窄微带宽度的金属化通孔。环形窄微带和金属化通孔的使用可以增加偶极子的输入阻抗, 并进一步降低天线高度。当偶极子 1 (端口 1) 被激励时, 可以产生沿着 -45° 方向的极化波。

偶极子 2 的结构与偶极子 1 的不同之处有以下三点: 首先, 扇形贴片的半径不同; 其次, 偶极子 2 的两个臂之间的距离不同; 第三, 偶极子 2 的扇形贴片有 4 个额外的凸起。偶极子 2 的扇形贴片的半径和两个臂之间距离的改变是为了调整阻抗匹配; 4 个凸起贴片的设计则是为了与偶极子 1 环形窄微带末端的金属化通孔相匹配, 确保偶极子 1 和偶极子 2 电连接。当偶极子 2 (端口 2) 被激励时, 可以产生 $+45^\circ$ 方向的极化波。本文天线使用 HFSS 19.2 进行仿真, 经过参数优化后, 天线几何尺寸如下: $h=9$ mm, $g_1=3.6$ mm, $g_2=2$ mm, $r_1=22$ mm, $r_2=21$ mm, $d_1=1.4$ mm, $\alpha=9.8^\circ$, $\beta=112^\circ$ 。



(a) 天线结构示意图



(b) 偶极子1和2的结构示意图

图1 天线结构

3 天线工作原理

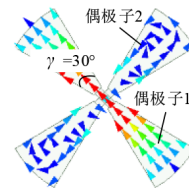
接下来,将通过设计演变过程中各天线的矢量电流分布和其端口的输入阻抗曲线来详细说明其工作原理. 对于图2中涉及的所有天线,沿着 -45° 方向的偶极子称为偶极子1,沿着 $+45^\circ$ 方向的偶极子称为偶极子2.

如图2(a)所示,在金属反射板上方30 mm (0.25λ)处放置了两个相互垂直的偶极子(为清晰起见,图中省略了金属反射板). 这两个偶极子的等效长度为半个波长,偶极子的扇形分支的张角为 30° . 当偶极子1被激励时,其表面上的电流幅度遵循正弦分布,在频率为2.3 GHz时,其端口输入阻抗的实部接近 $50\ \Omega$,虚部接近 $0\ \Omega$,阻抗匹配良好,见图3(a).

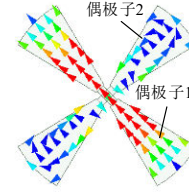
如图2(b)所示,当偶极子与反射器之间的距离减小到11.4 mm (0.09λ)时,偶极子1上的电流增加,端口输入阻抗的实部显著降低,如图3(b)所示.

根据文献[14]所述,半波偶极子可以用高输入阻抗的天线来代替,以补偿由于天线高度降低而引起的阻抗降低的问题. 显然,采用输入阻抗是半波偶极子输入阻抗4倍的折叠偶极子也是个不错的选择. 不过,传统的折叠偶极子是由两个在末端连接的偶极子组成^[15,16],很难实现双极化. 因此,在每个扇形辐射臂的末端沿着弧长方向设置环形窄微带,然后在这些环形窄微带的末端设置金属化通孔,使偶极子1和偶极子2电连接,如图2(c)所示. 这样不仅可以获得等效折叠偶极子的结构,而且可以轻松实现双极化. 从图3(c)中可以看到,此时天线端口输入阻抗的实部在频率为2.3 GHz时,增加至 $46\ \Omega$.

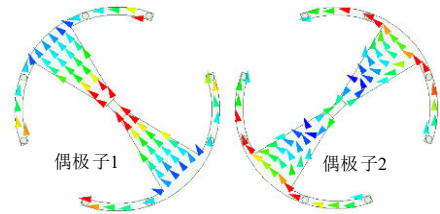
然而,图2(c)中的天线端口输入阻抗在高频带段



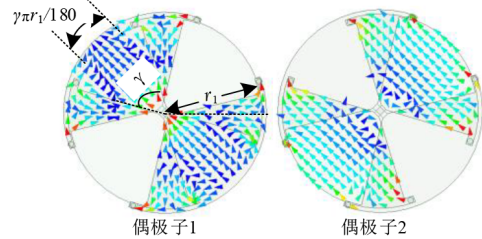
(a) 半波振子放置在金属反射板上方30 mm处,频率为2.3 GHz的电流分布图



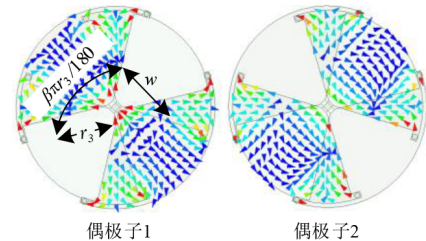
(b) 半波振子放置在金属反射板上方11.4 mm处,频率为2.3 GHz的电流分布图



(c) 加入环形窄微带和金属通孔后,天线频率为2.3 GHz时的电流分布



(d) 本文提出的天线在频率为2.3 GHz时的电流分布



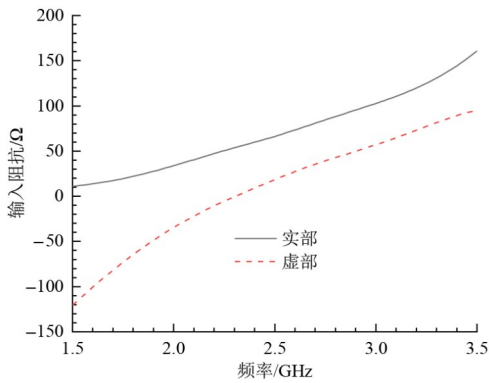
(e) 本文提出的天线在频率为2.65 GHz时的电流分布

图2 天线电流分布

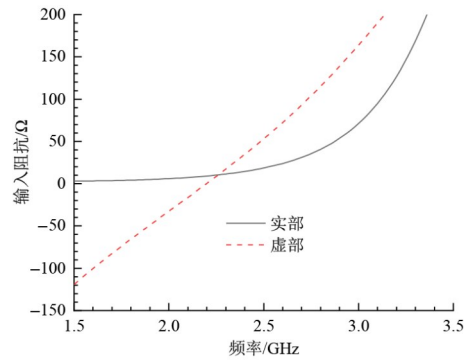
内(2.4~2.7 GHz)的实部太大、虚部太小,无法获得宽带阻抗匹配. 为了补偿天线的电容分量,将图2(c)中扇形贴片的张角从 30° 增加到 112° ,形成了如图2(d)所示的天线. 增加扇形贴片的张角不仅可以平衡天线的电感

和电容分量,还可以产生第二个谐振频点. 以传统半波偶极子为例来说明这个原理. 传统的半波偶极子,它的宽度远小于它的长度,可以谐振在奇模对应的频点,而且,在谐振频点处,偶极子仅具有沿长度方向的电流. 如果半波偶极子的宽度增加到与其长度相当,则形成一个新的天线,该天线可以看作是沿着长度方向延伸的半波偶极子和沿着宽度方向延伸的半波偶极子的组合. 此时,就会出现一个新的谐振点. 类似地,在本文中,当扇形贴片的张角从 30° 增加到 112° 时,就会出现

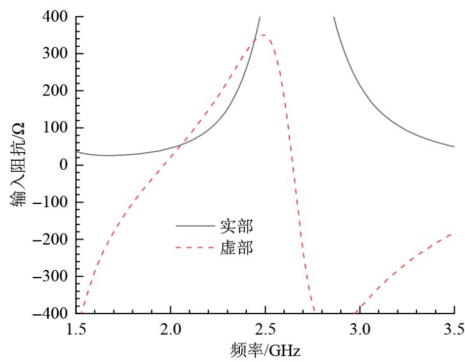
一个垂直于扇形贴片长度方向的谐振路径、产生第二个谐振点. 可以从图 2(d)和(e)中观察到这种现象:在 2.3 GHz 时,偶极子 1 可以等效为长度为 $2r_1$ 、宽度为 $\gamma\pi r_1/180$ 的偶极子,并且等效偶极子上的电流沿着扇形偶极子长度方向. 在 2.65 GHz 时,偶极子 1 可以等效为长度为 $\beta\pi r_3/180$ 、宽度为 w 的偶极子,并且等效偶极子上的电流沿着扇形偶极子宽度方向. 最终,该天线可以在 2.17~2.7 GHz 频段实现良好的阻抗匹配,如图 3(d)所示.



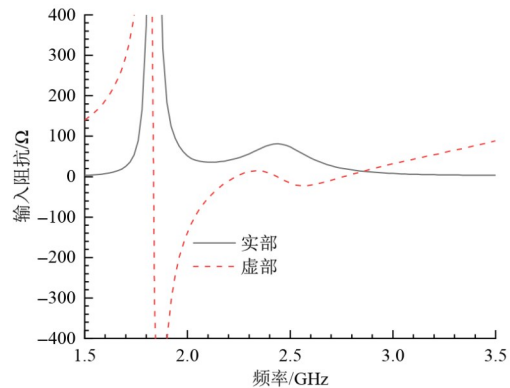
(a) 半波振子放置在金属反射板上方 30 mm 处,其端口输入阻抗曲线



(b) 半波振子放置在金属反射板上方 11.4 mm 处,其端口输入阻抗曲线



(c) 加入环形窄微带和金属化通孔后,天线端口输入阻抗曲线



(d) 本文所提出天线的端口输入阻抗曲线

图 3 天线输入阻抗曲线

下面讨论一些关键参数对天线性能的影响. 第一个参数是环形窄微带的张角 α . 根据微带等效电路的知识,当 α 增加而 β 保持不变时,天线等效电感值将增加. 这在图 4(a)中得到了验证. 随着 α 从 3.8° 增加到 15.8° ,天线的电感分量逐渐增加,补偿了其电容分量,使得端口输入阻抗虚部的平均值接近 0Ω . 综合考虑端口输入阻抗的实部和虚部, α 选择为 9.8° . 第二个参数是扇形贴片的张角 β . 从图 4(b)可以看出,当 β 从 60° 逐渐增加到 112° 时(金属化通孔和环形窄微带的位置保持不变),会产生第二个谐振点. 而且 β 值越大,第二个谐振

点的工作频率越低. 这进一步证明了偶极子臂/扇形辐射臂宽度的增加会产生沿宽度方向的电流,继而产生新的谐振点.

通过分析该天线的工作原理,并讨论关键参数对天线性能的影响,可以得到此类天线的理论设计流程,该流程有助于科研人员设计出适用于不同频率、不同极化要求的天线. 第一步,假定天线第一谐振点为 f_1 、第二谐振点为 f_2 ,根据文献[17]中的公式计算出第一谐振点 f_1 、第二谐振点 f_2 的介质波长 λ_{g1} 、 λ_{g2} ,

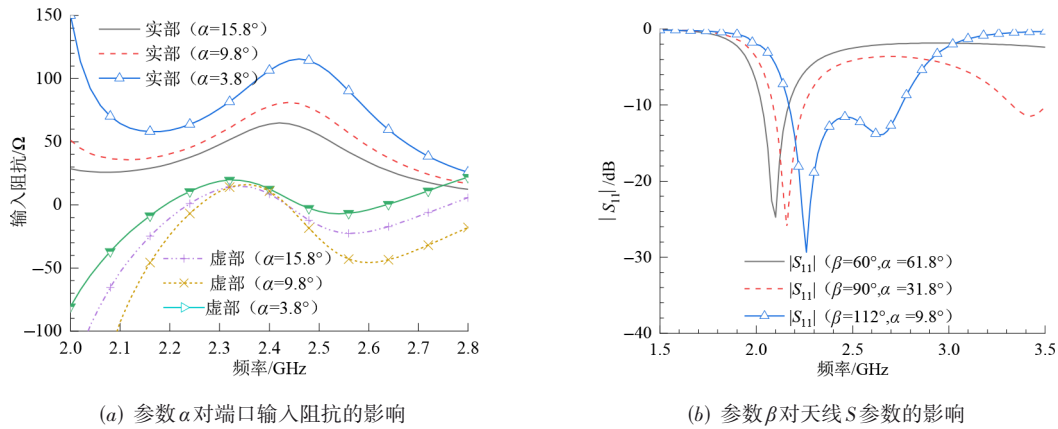


图4 各参数对天线性能的影响

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}}}} \quad (1)$$

其中, λ 是自由空间波长, ϵ_r 是介质板相对介电常数, h 是介质板厚度, w 是介质板宽度. 第二步, 设计一个长度约为 $0.5\lambda_{g1}$ 的传统半波偶极子天线, 由于波长缩短效应, 实际半波偶极子天线长度小于 $0.5\lambda_{g1}$. 第三步, 将上述半波偶极子沿宽度方向延伸至 $0.5\lambda_{g2}$, 延伸方式不限, 可以像本文中以扇形逐渐张开的方式向宽度方向延伸, 也可以直接增大矩形偶极子的宽度等. 经过第二步和第三步, 天线会形成两个谐振点. 第四步, 在“沿宽度方向延伸后偶极子”的末端设置窄微带, 窄微带的长度或者张角决定了等效电感值, 通过调整窄微带的长度或张角, 可以调整天线输入端口阻抗的虚部、调整阻抗匹配. 第五步, 在介质板另一侧设置与上述天线垂直的另一个天线, 实现双极化. 第六步, 在介质板两侧的窄微带末端, 设置一个或多个金属化过孔, 实现等效折叠偶极子. 上述天线具有高输入阻抗的特点, 可以改善由于天线高度降低而引起的阻抗下降的问题. 若上述天线需要转化为圆极化的极化方式, 可参考文献[18]中提到的方法, 在输入端口处设置 90° 移相微带线, 便可实现低剖面圆极化天线.

4 仿真与测试结果对比及分析

该天线采用印刷电路板技术制造, 并在微波暗室中进行了测试. 图5是天线实物照片. 图6给出了天线的仿真和测量的 S 参数. 当 $|S_{11}|$ 和 $|S_{22}|$ 小于或等于 -10 dB 时, 该天线可以覆盖 $2.17 \sim 2.7$ GHz 的频率范围, 带宽约为 22%. 由于偶极子 1 和偶极子 2 关于几何中心的对称性, 端口隔离的仿真值高达 51 dB, 端口隔离度的测量

值约为 42 dB. 图7给出了天线在 XOZ 面和 YOZ 面上的仿真和测量方向. 从图中可以看出: 0° 交叉极化鉴别度仿真值为 48 dB, 测量值为 32 dB; 天线前后比仿真值为 49 dB, 测量值为 43 dB; 天线半功率波瓣宽度仿真值为 $60^\circ \pm 1^\circ$, 测量值为 $62^\circ \pm 2^\circ$. 图8绘制了天线端口 1 被激励时的增益曲线. 从图中可以看出, 在 $2.17 \sim 2.7$ GHz 频段内, 增益仿真值范围为 $9 \sim 9.6$ dBi, 增益测量值范围为 $8.6 \sim 9.1$ dBi. 仿真和测量增益之间的差异可能是由介质板损耗、同轴电缆以及测试环境的影响引起的.

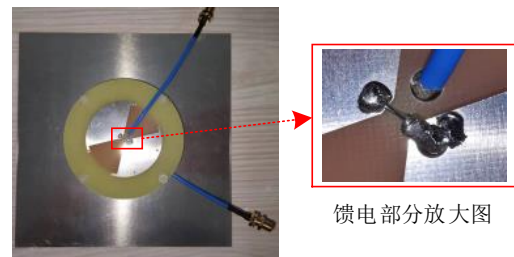


图5 天线实物照片

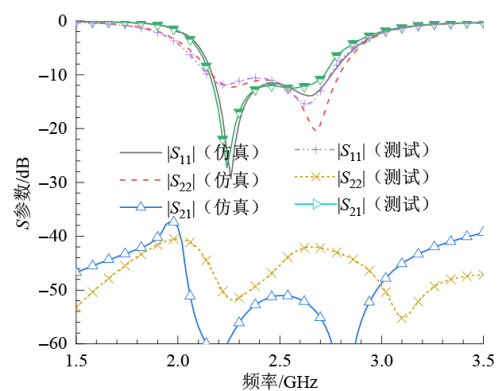


图6 S 参数仿真和测试值

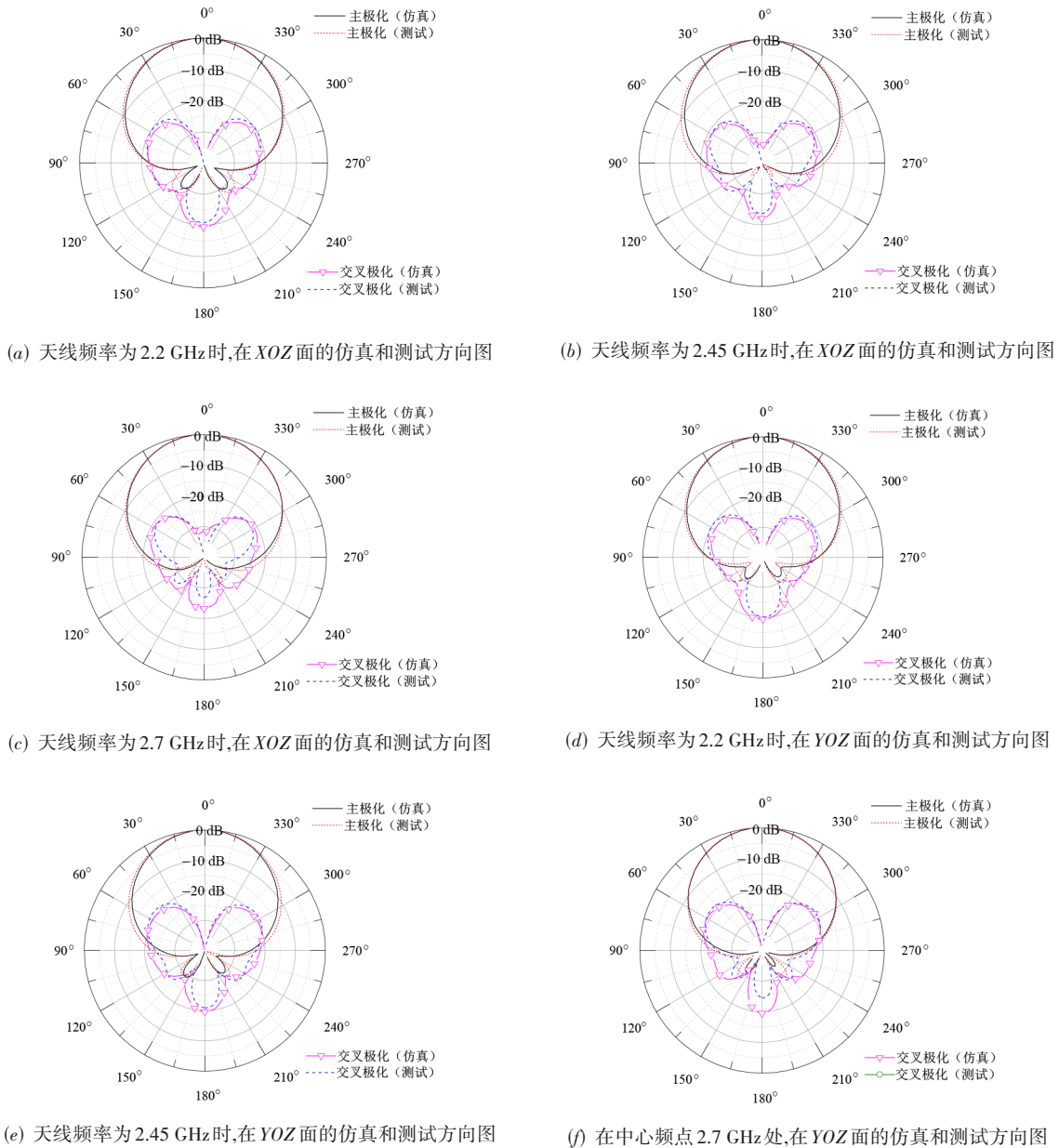


图 7 天线仿真和测试方向图

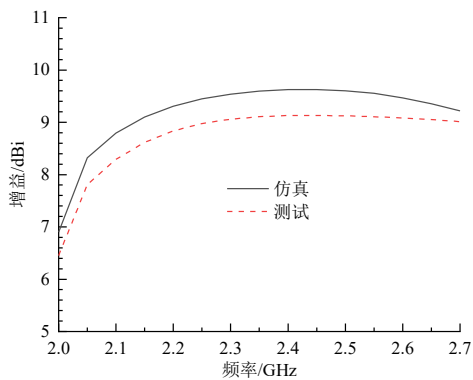


图 8 天线 1 端口被激励时的增益曲线

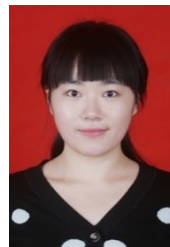
5 结论

本文提出了一种基于高输入阻抗偶极子的低剖面宽带双极化基站天线. 首先,在交叉放置的偶极子辐射臂的末端,沿着弧长方向设置环形窄微带,然后,在这些环形窄微带的末端设置金属化通孔,以提高天线的输入阻抗. 最后,增加扇形偶极子辐射臂的横向尺寸,即增大辐射臂的张角,以产生第二个谐振点,获得更大的带宽. 仿真和测量结果表明,该天线在整个工作频段内可以实现高隔离度、高交叉极化鉴别度、高前后比和高增益,可用于对小型化有较高要求的基站系统.

参考文献

- [1] YE L H, CHEN G R, SHI X, et al. Miniaturized broadband dual-polarized MIMO antenna array with stable radiation pattern for base-station application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(8): 6688-6697.
- [2] SUN S Y, DING C, JIANG W, et al. Simultaneous suppression of cross-band scattering and coupling between closely spaced dual-band dual-polarized antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(8): 6423-6434.
- [3] LI J G, LI J K, YIN J, et al. A miniaturized dual-band dual-polarized base station antenna loaded with duplex baluns[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(7): 1756-1760.
- [4] JIANG Z N, WANG Z X, NIE L Y, et al. A low-profile ultrawideband slotted dipole antenna based on artificial magnetic conductor[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2022, 21(4): 671-675.
- [5] WANG B, LIAO C Y, DU C H. A low-profile broadband dual-polarized base station antenna array with well-suppressed cross-polarization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(12): 8354-8365.
- [6] LI M, LI Q L, WANG B, et al. A miniaturized dual-band base station array antenna using band notch dipole antenna elements and AMC reflectors[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(6): 3189-3194.
- [7] LI M, LI Q L, WANG B, et al. A low profile dual-polarized dipole antenna using wideband AMC reflector[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(5): 2610-2615.
- [8] ZHAI H Q, XI L, ZANG Y P, et al. A low-profile dual-polarized high-isolation MIMO antenna arrays for wideband base-station applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(1): 191-202.
- [9] 孙胜, 王世通, 孙虎成. 一种双频四模极化可重构天线[J]. 电子学报, 2023, 51(8): 2168-2178.
SUN S, WANG S T, SUN H C. A dual-band quad-polarization reconfigurable antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(8): 2168-2178. (in Chinese)
- [10] GAO Y, MA R B, WANG Y P, et al. Stacked patch antenna with dual-polarization and low mutual coupling for massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(10): 4544-4549.
- [11] HUANG H, LI X P, and LIU Y M. A low-profile, dual-polarized patch antenna for 5G MIMO application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(2): 1275-1279.
- [12] HUANG H, LI X P, LIU Y M. A low-profile, single-ended and dual-polarized patch antenna for 5G application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(5): 4048-4053.
- [13] BEST. Improving the performance properties of a dipole element closely spaced to a PEC ground plane[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2004, 3: 359-363.
- [14] HUANG H, LI X P, LIU S Z, et al. A new method of antenna height reduction based on half-sized full-wave dipole[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(8): 6936-6940.
- [15] VERMA A, ARRAWATIA M, KUMAR G. Low-profile wideband high-gain folded dipole antenna[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2021, 20(6): 1058-1062.
- [16] JASIK H, JOHNSON R C. Antenna Engineering Handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1984.
- [17] 黄冶. 电磁场、微波技术与天线[M]. 第3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2021: 131-132.
HUANG Y. Electromagnetic Field, Microwave Technology and Antenna[M]. 3rd Edition. Xi'an: Xidian University Press, 2021: 131-132. (in Chinese)
- [18] XU R, LIU J, WEI K, et al. Dual-band circularly polarized antenna with two pairs of crossed-dipoles for RFID reader[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2021, 69(12): 8194-8203.

作者简介



黄河 女, 1990年出生于西安市. 现为西安电子科技大学空间科学与技术学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为航天器天线、基站天线、长波天线.

E-mail: huanghe@xidian.edu.cn



马瑞华 女, 1999年出生于石家庄市. 现为西安电子科技大学空间科学与技术学院博士生. 主要研究方向为可重构天线、基站天线、长波天线.

E-mail: ruihua.ma@foxmail.com