

基于串并联结合馈电的高增益垂直极化全向天线

王琛¹, 徐慧娟², 杨龙³, 周文涛³, 王娜³

(1. 航天系统部装备部军代局驻成都地区军代室, 四川 成都 610036;

2. 中国人民解放军 63620 部队, 甘肃 兰州 730000; 3. 西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 采用基于串并联结合馈电的方法设计了一种高增益垂直极化全向天线。采用印刷偶极子天线作为基本辐射单元; 将 4 个该基本辐射单元组成串馈阵列以提高天线增益; 为进一步提高天线增益和改善串馈阵方向图的频偏特性, 将两个四元串馈阵列并联起来, 并通过微带线从并联中心馈电; 最后将金属支撑与微带馈电网络对称设计, 实现良好的馈电和改善水平面方向图的不圆度。制作了天线实物并进行了测试, 实物的测试结果表明, 天线在 7.4 GHz~8.4 GHz 的频段内 $VSWR \leq 2$, 阻抗带宽为 13%。在工作频段内天线方向图不圆度小于 2.5 dB, 增益大于 8 dB。此外, 天线的横向尺寸小于 $0.7\lambda_0$ 。该天线结构紧凑、加工方便、性能优良, 可应用于宽带、高增益、全向空域覆盖的通信系统中。

关键词: 印刷偶极子; 串并联馈电; 高增益; 垂直极化全向天线

中图分类号: TN820.1

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222874

中文引用格式: 王琛, 徐慧娟, 杨龙, 等. 基于串并联结合馈电的高增益垂直极化全向天线[J]. 电子技术应用, 2022, 48(10): 97-102.

英文引用格式: Wang Chen, Xu Huijuan, Yang Long, et al. A high gain vertically polarized omnidirectional antenna based on series-parallel feeding method[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10): 97-102.

A high gain vertically polarized omnidirectional antenna based on series-parallel feeding method

Wang Chen¹, Xu Huijuan², Yang Long³, Zhou Wentao³, Wang Na³

(1. The Military Representative Office of the Equipment Department of the Aerospace System Department in Chengdu, Chengdu 610036, China;

2. Unit 63620 of the PLA, Lanzhou 730000, China; 3. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: A vertically polarized omnidirectional antenna with high gain is proposed based on the method of series-parallel feeding. Firstly, a printed dipole antenna is used as the basic radiation unit, and then four of the basic radiation units are formed into a series-fed array to improve the antenna gain. Secondly, in order to further increase antenna gain and make the antenna patterns of the series-fed array desensitize to frequency, two four-element series-fed arrays are connected in parallel and fed from the center through a parallel feed network. Finally, the metal support and the microstrip feeding network are symmetrically designed to achieve good feeding and improve the unevenness of the pattern in the horizontal plane. The antenna was fabricated and measured. The experimental results show that the impedance bandwidth of the antenna is 13% and the $VSWR \leq 2$ in the frequency range of 7.4 GHz~8.4 GHz. The gain variations in the horizontal plane less than 2.5 dB and the gains are more than 8 dB across the operating band. In addition, the transverse size of the antenna is less than $0.7\lambda_0$. The antenna has the advantages of compact structure, convenient processing and excellent performance. It can be used in wide-band, high-gain and wide-angle space coverage communication systems.

Key words: printed dipole; series-parallel feeding; high gain; vertically polarized omnidirectional antenna

0 引言

随着现代无线通信技术的飞速发展, 具有稳定的全向波束覆盖能力的垂直极化全向天线越来越受到人们的重视^[1-4]。然而它们中的大多数很难同时满足宽带宽、高增益、结构紧凑、简单可行的馈电网络等要求, 大大限制了其应用范围。

通常, 垂直偶极子和单极子是最常见的垂直极化全

向天线^[5-6]。然而, 它们的窄带宽和有限的增益仍然是未来应用的挑战。通过将长同轴电缆的内外导体互换, 同轴共线天线可以获得 10 dB^[7-8]以上的增益, 但是阻抗带宽往往较窄(小于 10%)。然后, 学者提出了一种全向平面微带天线^[9]和一种全向平面缝隙天线^[10], 它们分别由一系列交替布置在每个结合处的微带天线段和一系列刻蚀在两条平行带线上的矩形环槽组成, 虽然它们可以

达到 6 dB 以上的高增益,但是它们的阻抗带宽都小于 10%,而且它们的波束方向对工作频率很敏感,导致不稳定的辐射方向图。文献[11]中的平面垂直极化全向天线采用背靠背的印刷偶极子单元排列获得较高的增益,但带宽仅为 5.5%。在文献[12]中,采用非对称偶极子和寄生条可实现双频带宽,相对带宽分别为 20.2%和 21.3%,它在两个频带的增益都在 6.5 dBi 以上。在文献[13]中,学者提出了一种新型的垂直极化全向天线,该天线采用 3 个单元,每个单元由三维偶极子和寄生偶极子垂直安装组成,每个单元与相邻单元呈 120° 夹角,使阻抗带宽超过 30%,增益从 5.7 dB 增加到 8.0 dB。文献[14]提出了一种非对称 U 形柱宽带全向天线阵列,采用非对称 U 形柱天线激励附加谐振模式,其工作带宽可超过 30%。然而不足的是,文献[12]~[14]中的这 3 个天线的良好性能均以牺牲横向尺寸为代价,造成庞大而复杂的几何形状。

本文提出了一种采用串并联结合馈电的宽带高增益垂直极化全向天线。首先,研究了易于组阵的常规印刷偶极子天线形式并对单元进行了设计。在此基础上,设计了串联馈电的四元串馈阵列,并将两个四元串馈阵列并联起来,通过微带网络从中心连接处馈电,由此获得了所设计的天线。在设计中对阵列的演变形式及阵列的性能进行了分析。最后,将金属支撑与并联馈电网络对称设计,实现良好的馈电和改善方向图的不圆度。

1 天线设计与分析

图 1 所示为基于串并联结合馈电的高增益垂直极化全向天线的整体结构图。该天线印刷在介电常数为 2.65、损耗角正切为 0.002 的介质基板两面。介质基板高度为 275 mm,宽度为 24 mm。阵列从中点可以分为上下两个四元串馈阵列,通过微带线从中点位置给上下两个四元串馈阵列并联馈电。为减小馈线对阵列偶极子的影响,在阵列 $+x$ 轴方向引入一个金属支架以支撑微带介质板,同时将下阵列的 y 轴方向两个对称偶极辐射臂间的距离变大,以最小程度减小金属支架对辐射的影响。为保证方向图的对称性,在 $-x$ 轴方向也引入一个对称的金属支架。微带馈线印刷在微带介质板上并往下端延伸以连接同轴电缆。

1.1 天线单元设计

印刷偶极子天线因其结构紧凑、重量轻、易于加工制作和辐射性能稳定等优点广泛用于高增益阵列天线设计中。根据馈电方式的不同,常用的印刷偶极子天线有的以下几种形式,如图 2 所示:图 2(a)为微带线馈电方式,该方式馈电简单,易于调试,但微带地板横向尺寸较大,容易与偶极子臂耦合,从而影响天线性能;图 2(b)为平行双线馈电,这种结构简单且为平衡馈电形式,相比微带线馈电其馈线宽度更小,不易干扰振子臂的辐射;图 2(c)为耦合馈电方式,可以用于增加偶极子的阻抗带宽,但是其不容易实现天线组阵。为实现较小的横

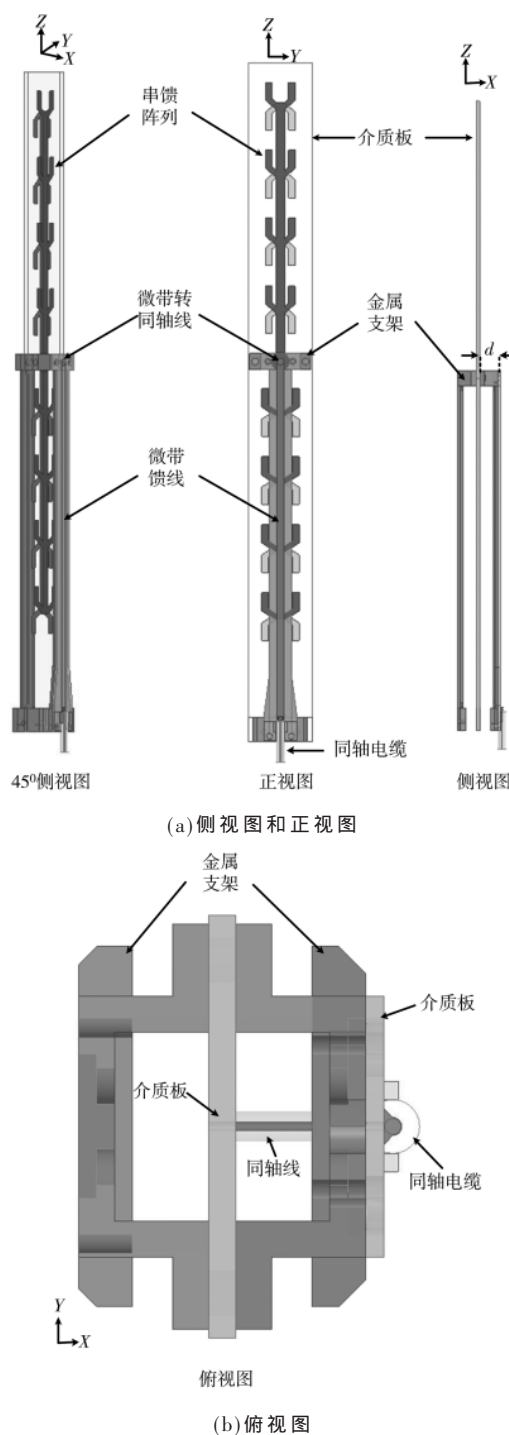


图 1 基于串并联结合馈电的高增益垂直极化全向天线结构图

向尺寸且有利于组阵,故选取图 2(b)所示的平行双线馈电方式的印刷偶极子作为阵列的基本辐射单元。

1.2 阵列的演进

为描述这种串并结合的高增益阵列天线形式,图 3 展示了其演化过程。首先,图 3(a)为一种常见的串联馈电的偶极子阵列天线,阵列为四元阵,从最下端端口馈电,阵间距按中频时方向图最大波束指向为水平面时设计,即为 $25\text{ mm} \approx 0.65\lambda_0 \approx \lambda_g$ 。由于平行双线上电流随频

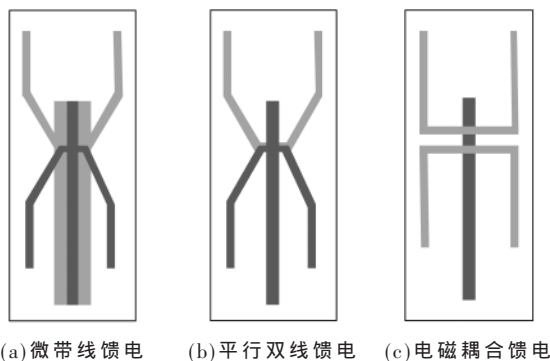


图2 常用的印刷偶极子天线形式

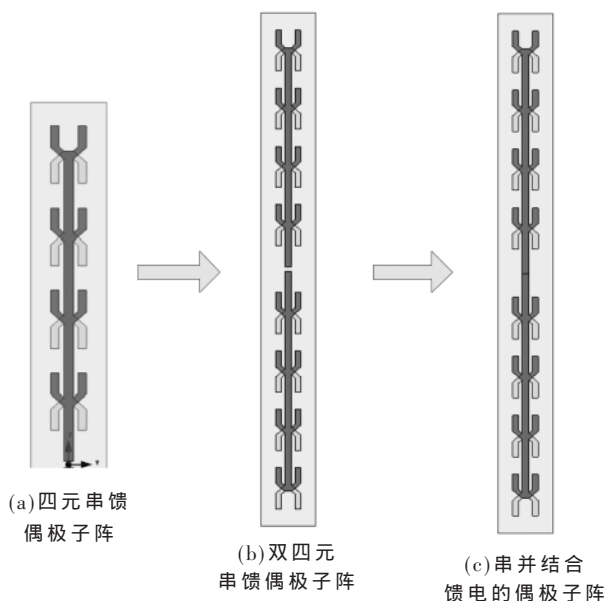


图3 所设计天线阵列的演进过程图

率变化的特性,低频时到达振子上的电流相位依次超前,导致低频方向图下倾,同样原理高频时方向图则上翘;然后,将其复制并旋转 180° ,演变为图3(b)所示的双串联偶极子阵,这样做的好处是通过两个阵列的叠加,可以弥补方向图在工作低频端和高频端方向图的下倾和上翘带来的增益损失,下面部分会详细阐述其叠加过程。最后将两个串馈阵组合成一个从中心并联馈电的阵列,这样便构成了串并联结合的阵列,如图3(c)所示。

图4给出了图3(b)所示的两个串联阵列单独馈电和同时馈电时的叠加方向图。当在中心频率 7.9 GHz 时,上下阵列单独馈电时方向图最大指向均在水平面,故其叠加方向图也在水平面;当天线工作频率偏离中心频率时,上下阵列单独馈电时方向图最大指向偏离水平面,分别下倾和上翘,但其叠加方向图的最大指向仍在水平面。需要说明的是,低频时阵列的电尺寸较小,故单独的四元串馈阵列的波瓣宽度较大,故叠加后在最大方向仍然有较多能量。高频时单独馈电的四元串馈阵列虽然由于电尺寸较大导致波瓣宽度较小,但叠加后易导致

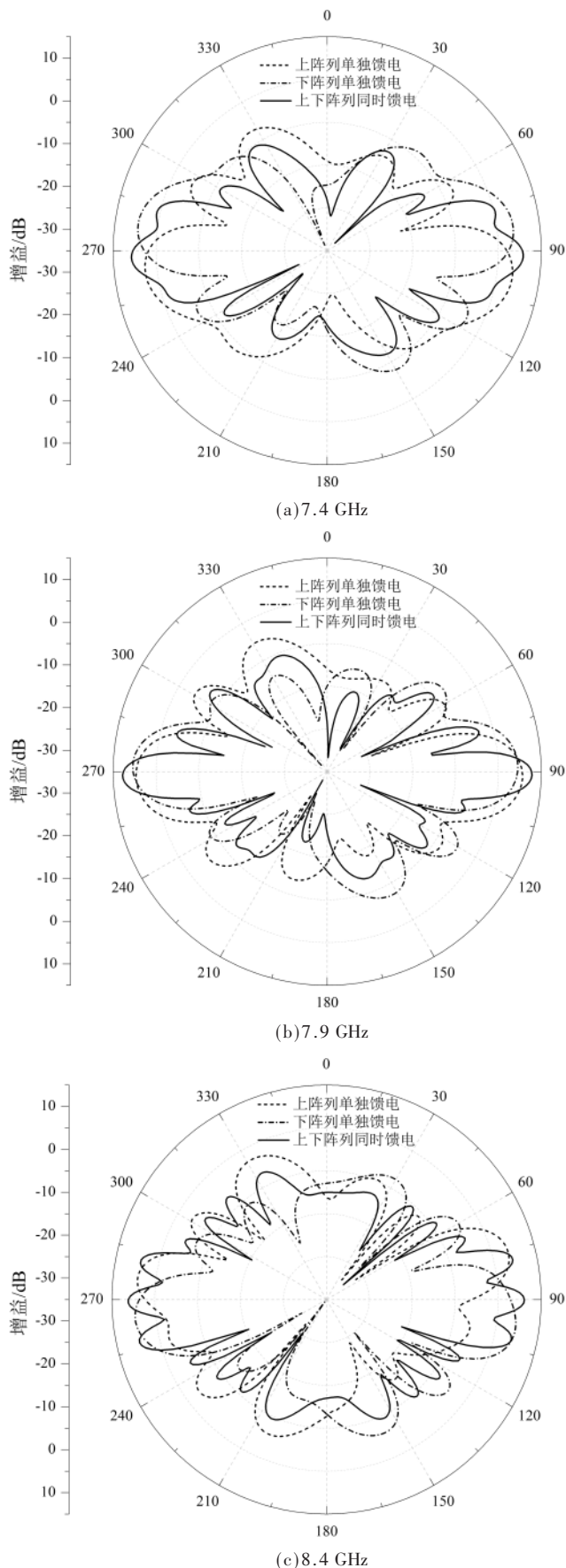


图4 串并馈阵列的方向图叠加

主波束附近产生较大的副瓣。

1.3 串并结合馈电

从上述对两个串联阵列单独馈电和同时馈电时的叠加方向图的分析中可以看到,这种串并联结合的形式可以克服单独串联馈电方向图指向随频率变化的问题,因而可以用来设计高增益的全向阵列。但是,如图 3(c)所示,该馈电方式需要在阵列中心馈电,同轴馈线的走线是需要解决的问题。传统的设计方法是将同轴线直接贴在平行双线延伸到底端,但是经研究发现,由于该阵列工作频率较高,同轴线的一部分电流会沿着外导体外壁流动到平行双线,从而扰乱平行双线上平衡电流的传输,导致天线的辐射性能恶化。因此本节设计了如图 1 所示的用天线架支撑的微带网络实现天线的馈电。为保证方向图的对称性,在 $-x$ 轴方向也引入一个对称的金属支架。

研究发现,有无金属支架、金属支架存在时其与阵列的距离对阵列的性能影响较大,下面将对无金属支架和有金属支架时不同的距离的情况进行讨论,按天线中心频率 7.9 GHz 时的波长 λ_0 ,对 d 的值分别为 $0.1\lambda_0$, $0.2\lambda_0$ 和 $0.3\lambda_0$ 的情况下天线在水平面的增益和不圆度进行了计算,如表 1 所示。

表 1 不同 d 值情况下天线的最大、最小增益和不圆度

频率/GHz	$d=0.1\lambda_0$	$d=0.2\lambda_0$	$d=0.3\lambda_0$	无金属支架
7.4	10.2/6.9/3.3	9.4/8.2/1.2	10.6/6.8/4	10.8/6.6/4.2
7.9	10.2/7.0/3.2	10.4/8.7/1.7	10.9/5.9/5	11.5/7.4/4.1
8.4	10.9/7.5/3.4	10.4/8.5/1.9	9.8/7.3/2.5	10.9/7.3/3.6

从表 1 可以看出,当阵列取掉金属支架并从阵列中心理想馈电时,天线在水平面的不圆度较差,能量主要分布在 $\pm x$ 方向,在 $\pm y$ 方向能量较小;当加上金属架后,天线的圆度反而变好,说明金属支架相当于一块反射板,可以使能量重新分配。因此,金属支架距离阵列的距离应该合理优化。当 $d=0.2\lambda_0$ 时,天线在全频带有大于 8 dB 的最小增益和小于 2 dB 的不圆度。当偏离此距离时,天线的圆度均会恶化,天线圆度恶化的主要源头金属支架的距离影响能量的重新分布,非最优的距离 d 主要导致水平面最小增益变小。

2 天线仿真及测试

为了减小地面对天线性能的影响,在上述阵列的下端加长了 300 mm 的长度以架高天线。为实现天线防水、防盐雾等要求,在阵列外面加上天线罩,天线罩选取玻璃钢管。为便于安装,在天线最下端设置了法兰盘。根据仿真优化并结合天线的工程应用,最终加工了天线样机如图 5 所示。天线最大直径为 26.5 mm,天线高度为 600 mm。为保证较小的天线横向尺寸,天线的金属支架到阵列距离为 7.6 mm。

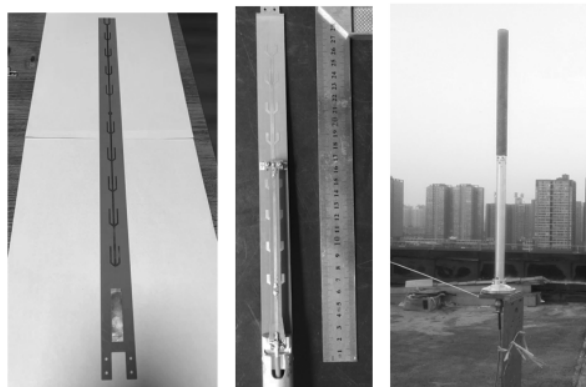


图 5 串并馈高增益阵列的天线实物图

利用矢量网络分析仪 Agilent E8363B 对天线实物的电压驻波比(VSWR)进行了测试,图 6 给出了天线实测电压驻波比。天线电压驻波比的实测结果表明,天线电压驻波比小于 2 的阻抗带宽为 13%。

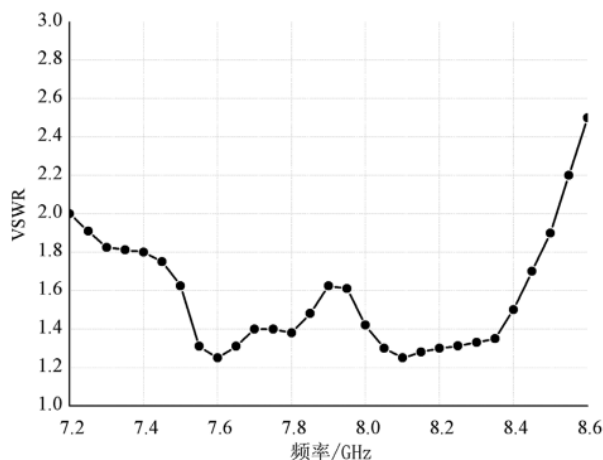


图 6 天线的电压驻波比曲线

在微波暗室中对天线的辐射特性进行了测试,图 7 是仿真结果和对实物天线测试得到的 E 面和 H 面方向图。从结果可以看出,仿真和测试结果吻合良好,受加工误差和测量误差的影响,E 面方向图的副瓣测试结果比仿真要高,天线在水平面的测试不圆度比仿真结果要差,在 7.4 GHz、7.9 GHz 和 8.4 GHz 3 个频点处的不圆度分别为 2.5 dB、2 dB 和 2.2 dB。图 8 给出了串并馈结合的全向阵列天线的仿真和测试增益(水平面最小增益),可以看到仿真和测试增益吻合较好,测试结果表明该天线在 7.4 GHz~8.4 GHz 的工作带宽内增益大于 8 dB。

3 结论

本文提出了一种基于串并联结合馈电的高增益垂直极化全向天线。为了获得高增益以及方位面上较小的不圆度,对阵列的演化过程进行了探讨。为了验证该天线的性能,设计、制作并测试了该天线实物。测试结果表

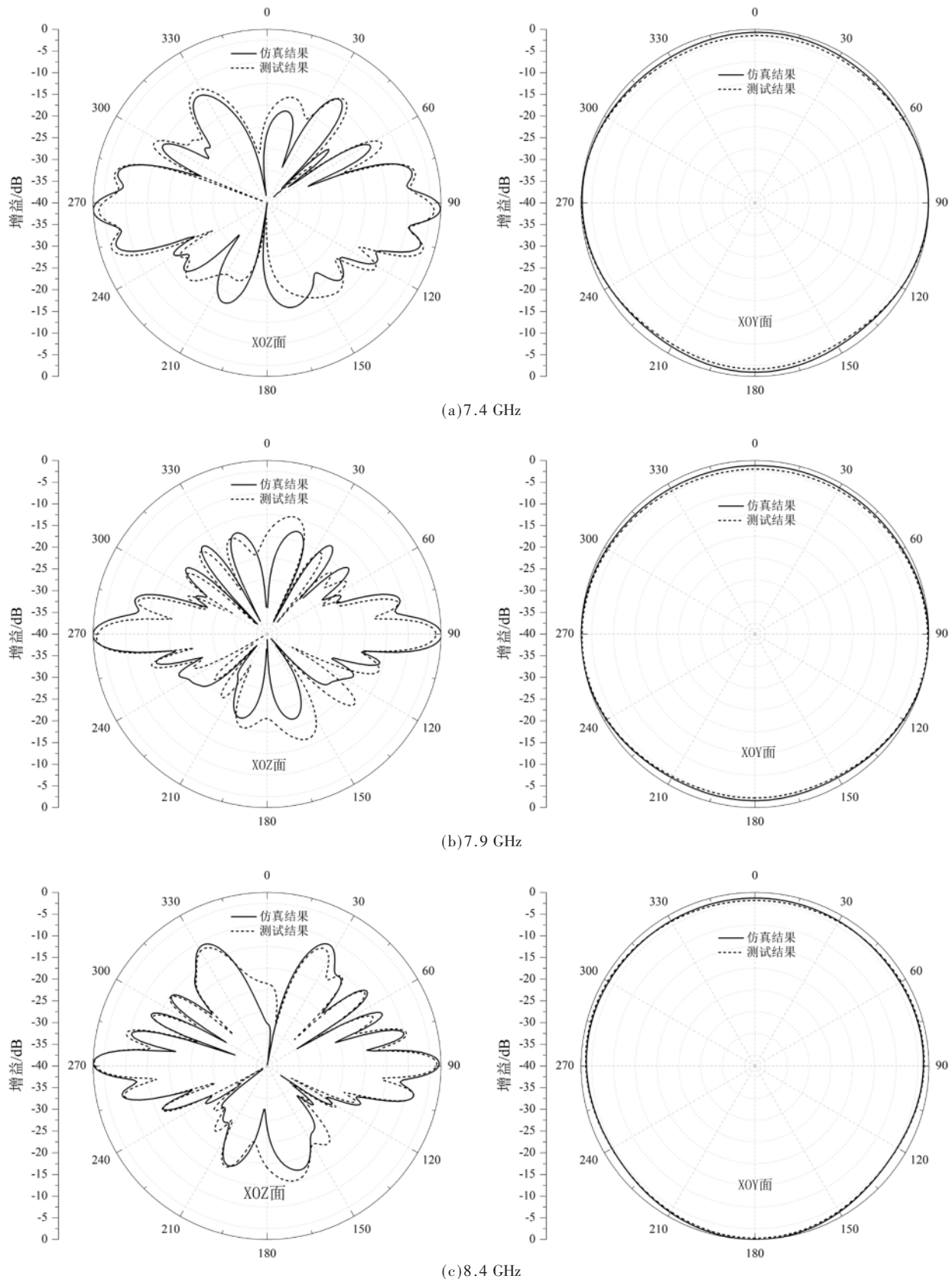


图7 天线仿真和测试方向图

明,该天线 $VSWR \leq 2$ 时的阻抗带宽为 13%(7.4~8.4 GHz), 天线在工作频带内不圆度小于 2.5 dB,增益大于 8 dB。

该天线结构简单、横向尺寸小、辐射性能优良,可以应用于宽角空域覆盖的全向通信系统。

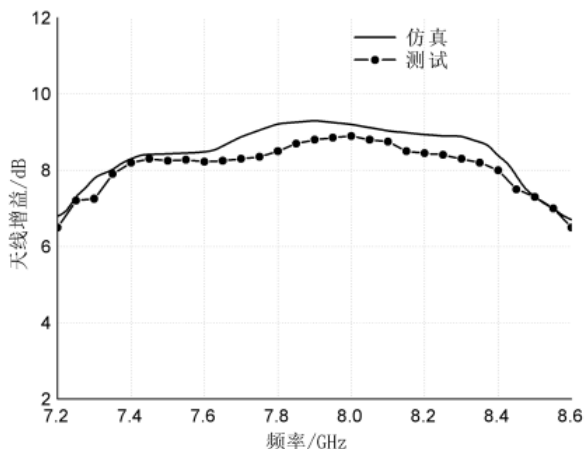


图8 天线仿真与实测增益曲线

参考文献

- [1] SIERRA-PEREZ M, HERAS-ANDRES F L, LOPE J A G D. Low-cost printed collinear array antenna[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, 43(5): 23-30.
- [2] HSIAO F R, WONG K L. Omnidirectional planar folded dipole antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(7): 1898-1902.
- [3] ZIVANOVIC B, WELLER T M, COSTAS C. Series-fed microstrip antenna arrays and their application to omnidirectional antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(10): 4954-4959.
- [4] 卢麒屹, 傅光, 张志亚, 等. 一种带有寄生贴片的全向印刷天线[J]. 微波学报, 2010, 26(Z2): 187-189.
- [5] LAU K F, LUK K M. A wideband monopolar wire-patch antenna for indoor base station applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005, 4: 155-157.
- [6] 汤燕, 曹振新. 一种高效率高阻抗全向 COCO 天线[J]. 微波学报, 2012, 28(3): 86-89.
- [7] JUDASZ T J, BALSLEY B B. Improved theoretical and experimental models for the coaxial colinear antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(3): 289-296.
- [8] KIANG J F. Analysis of linear coaxial antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(5): 636-642.
- [9] BANCROFT R, BATEMAN B. An omnidirectional planar microstrip antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(11): 3151-3153.
- [10] CHEN X, HUANG K, XU X B. A novel planar slot array antenna with omnidirectional pattern[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(12): 4853-4857.
- [11] WONG K L, HSIAO F R, CHIOU T W. Omnidirectional planar dipole array antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(2): 624-628.
- [12] LU J H, YOU S W, CHIN H M. Planar dual-band dipole array for LTE/WiMAX access points[C]//2014 International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings, 2014: 329-330.
- [13] YU Y F, XIONG J, WANG R. A wideband omnidirectional antenna array with low gain variation[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 386-389.
- [14] WANG H, HE S, YU Y F. A wideband omnidirectional antenna array[C]//2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, 2016: 207-213.

(收稿日期: 2022-04-17)

作者简介:

王琛(1976-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 航天测控、相控阵天线。

徐慧娟(1979-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 航天测控、相控阵天线。

杨龙(1988-), 通信作者, 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 航天测控、相控阵天线, E-mail: wuyanqianzi@163.com。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所