

# 一种全向圆极化天线设计

赵东贺, 韩国栋, 刘桂凤

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

**摘要:** 针对传统全向圆极化天线结构复杂、体积较大的问题, 提出了一种基于四臂螺旋结构的新型全向圆极化天线设计方法; 提出的天线通过螺距为 1.2 倍中心频率波长的长螺距的四臂螺旋天线结构实现了全向圆极化辐射; 设计的微带功分移相一体化网络能够使得四根螺旋臂实现幅度相等, 相对相位关系为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$  的激励信号; 最终提出的天线用简单结构实现了天线全向圆极化辐射特性; 通过仿真软件对天线的设计参数进行了计算和优化设计, 通过激光直写式 3D 打印技术加工了天线样机, 测试结果与计算结果基本一致; 提出的天线在 2~2.25 GHz 频带范围内电压驻波比小于 1.6, 在工作带宽内增益大于 1.7 dBi, 轴比小于 3 dB, 水平面方向图的不圆度小于 1.2 dB, 具有良好的全向圆极化辐射特性。天线具有结构简单紧凑, 体积小、易于工程实现等特点, 其应用前景非常广阔。

**关键词:** 全向天线; 圆极化天线; 四臂螺旋; 移相功分器

## Design of Omnidirectional Circularly Polarized Antenna

ZHAO Donghe, HAN Guodong, LIU Guifeng

(54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of complex structure and large volume of traditional omnidirectional circularly polarized antenna, a new design method of omnidirectional circularly polarized antenna based on quadrifilarhelix structure was proposed. Omnidirectional circularly polarized radiation was realized by a quadrifilarhelix structure with a long pitch of 1.2 times central frequency wavelength. A microstrip power phase-shifting integrated network was designed to achieve the same amplitude and the relative phase relations of the four spiral arms were  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  and  $270^\circ$ . A simple structure is used to realize the radiation characteristic of omnidirectional circular polarization. The design parameters of the antenna are calculated and optimized by simulation software, and the antenna prototype is processed by laser direct writing 3D printing technology. The testing results were basically consistent with the calculated results. And the fabricated antenna can provide the VSWR of less than 1.6, the gain of greater than 1.7 dB, the axial ratio of less than 3 dB and the horizontal plane pattern variations of less than 1.2 dB in the range of 2~2.25 GHz. Besides, it has good omnidirectional radiation characteristics of circular polarization. The antenna has the characteristics of simple and compact structure, small volume and easy engineering implementation, and has a very broad application prospect.

**Keywords:** omnidirectional antenna; circularly polarized antenna; quadrifilarhelix; phase shift power splitter

## 0 引言

天线是无线通信系统中接收或副辐射电磁波的装置, 完成射频导波与空间无线电波的能量装换, 在现代通信系统中具有无可替代的作用<sup>[1]</sup>。根据发射和接收电磁波的方向性, 一般可以将天线划分为定向天线和全向天线。与定向天线相比, 全向天线辐射的电磁波信号和能量是沿着天线水平周围均匀辐射, 可以实现水平面任意方位的电磁波的接收或发射, 更适用于海、陆、空等等环境<sup>[2-3]</sup>大范围覆盖的应用场景。同时, 线极化天线也逐渐无法满足通信系统性能不断更新换代的需求, 圆极化天线的应用越来越广泛。全向圆极化天线综合了全向天线的  $360^\circ$  全方位覆盖和圆极化天信号抗干扰能力强的两大优点, 在遥测遥感、移

动通信、频谱感知及电视广播等无线系统的应用都有着非常重要的意义。

目前实现方法主要有三种: 第一种是通过将圆极化单元、倾斜极化单元和正交线极化单元进行按一定的相对位置关系进行排布<sup>[4-5]</sup>, 采用合适的馈电网络进行馈电合成, 实现天线的全向圆极化辐射。第二种是通过向天线进行加载, 实现圆极化设计。文献 [6-7] 分别通过对全向天线加载高介电常数介质单元和螺旋缝隙结构, 将线极化波分解成垂直极化波和水平极化波, 形成固定相差的正交极化分量以形成圆极化辐射。第三种方法即采用多个天线组合<sup>[8-9]</sup>, 通过具有全向性的不同极化分量的天线单元进行组合, 并使之形成  $90^\circ$  的相位差, 以此实现全向圆极化天线。

收稿日期: 2022-03-06; 修回日期: 2022-04-15。

基金项目: 河北省高层次人才资助项目(A202101005)。

作者简介: 赵东贺(1984-), 男, 河北沧州人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事微带天线, 阵列天线设计等方向的研究。

韩国栋(1980-), 男, 山东潍坊人, 博士, 研究员, 主要从事相控阵天线、电磁计算方向的研究。

刘桂凤(1988-), 女, 河北保定人, 博士, 高级工程师, 主要从事终端天线、微带天线和阵列天线设计等方向的研究。

引用格式: 赵东贺, 韩国栋, 刘桂凤. 一种全向圆极化天线设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(8): 224-229, 235.

最典型的结构是环天线—偶极子形式, 偶极子模型产生垂直极化波, 环形天线产生水平极化波, 通过调整天线结构参数实现全向圆极化辐射。以上方法性能各有偏重, 但普遍存在结构复杂、加工难度大的缺点, 制约了全向圆极化天线的工程应用。

本文基于对长螺距四臂螺旋天线辐射特性的分析, 提出了一种全向圆极化天线设计方式。通过螺距为 1.2 倍中心频率波长的长螺距的四臂螺旋天线结构实现全向圆极化辐射, 采用微带功分移相一体化网络对四根螺旋臂进行激励。用简单结构实现了天线全向圆极化辐射特性。为了验证天线设计的正确性, 加工了天线样机。测试结果表明在 2~2.25 GHz 频带范围内电压驻波比小于 1.6, 增益大于 1.7 dBi, 轴比小于 3 dB, 水平面方向图不圆度小于 1.2 dB。天线具有结构简单紧凑, 全向圆极化辐射特性良好等特点

## 1 全向圆极化天线原理

### 1.1 螺旋天线介绍

螺旋天线是一类由一根或多根导体绕成螺旋结构的的天线形式。典型的螺旋天线由一根导体绕制的螺旋结构和金属接地板组成, 通过同轴结构馈电。螺旋结构一端与同轴结构内导体连接, 金属接地板与同轴结构外导体相连。螺旋天线是一种三维结构, 描述其结构的参数包括: 螺旋螺距、螺旋直径、螺旋线直径、螺旋周长、螺旋升角、圈数、轴长和单圈螺旋长度等。其中最重要的参数是螺旋结构的直径 ( $D$ ), 当直径 ( $D$ ) 与波长 ( $\lambda$ ) 的比值变化时, 天线辐射模式产生变化。根据辐射模式的不同, 螺旋天线可分为三类<sup>[8]</sup>, 即法向模螺旋天线、轴向模螺旋天线和圆锥模螺旋天线, 如图 1 所示。

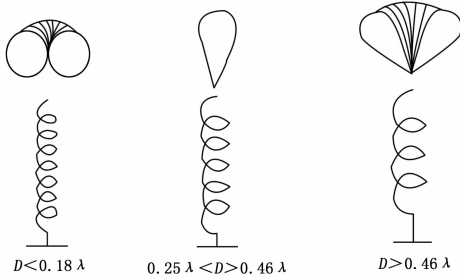


图 1 螺旋天线辐射模式示意图

第一类是法向模螺旋天线, 当螺旋的直径  $D$  很小, 远小于波长  $\lambda$  时 ( $D < 0.18 \lambda$ ) 时, 天线的最大辐射方向在垂直于螺旋轴线方向的平面上, 且在该平面内方向图为圆形分布, 其三维方向图类似于直线型偶极天线的方向图。法向模螺旋天线尺寸结构较小, 可归类于电小天线, 多用于对讲机、手持机的天线场景。第二类是轴向模螺旋天线, 当螺旋的直径  $D$  增大时, 天线的最大辐射方向逐渐向轴线方向移动。当螺旋天线的直径增大到  $0.25 \sim 0.46 \lambda$  时, 螺旋线的周长约为一个波长, 天线的最大辐射方向为轴线方向, 此时螺旋天线同样具有良好的阻抗特性和圆极化特性, 是实现圆极化天线的重要分支。轴向模螺旋天线的应用范

围远大于其余两种模式的螺旋天线。第三类是圆锥模螺旋天线, 当螺旋结构的直径  $D$  进一步增大到大于  $0.46 \lambda$  时, 天线方向图最大辐射方向会偏离轴线方向, 能量向不同方向辐射, 方向图变成圆锥形。圆锥模螺旋天线的相关研究和工程应用很少。

### 1.2 四臂螺旋天线原理

四臂螺旋天线是在轴向模螺旋天线的基础上演化而来, 可以看成四条幅度相等、相位以此相差  $90^\circ$  单绕螺旋天线的组合。C. C Kilgus 在 1968 年提出了谐振式四臂螺旋天线结构, 并进行了四臂螺旋天线理论方面的研究<sup>[11-13]</sup>。四臂螺旋天线通常由四根等长的均匀绕制在圆柱体上的螺旋线构成, 其中每根螺旋线长度为四分之一波长的整数倍, 四根螺旋线分别由幅度相等, 相位依次为  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  的信号馈电。典型的四臂螺旋结构如图 2 所示, 其结构参数主要有包括  $r_0$  (螺旋半径)、 $P$  (螺距)、 $n$  (螺旋圈数)、 $L_c$  (螺旋线长度) 及  $L$  (轴向长度), 此外结构参数应满足下式。

$$P = \frac{1}{N^2} (L_c - Ar_0) - 4\pi^2 r_0^2 \quad (1)$$

其中:

$$A = \begin{cases} 1, \text{末端开路} \\ 2, \text{末端短路} \end{cases}$$

天线四段螺旋线长度  $L_e$  通常为  $m\lambda/4$ , 其中  $m=1, 2, 3, \dots$ , 当  $m$  为奇数时, 螺旋末端为开路结构, 当  $m$  为偶数时, 螺旋末端为短路结构。

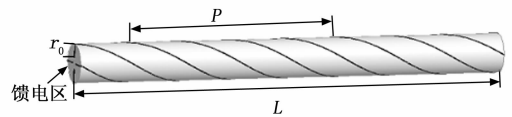


图 2 四臂螺旋结构示意图

四臂螺旋天线的工作机制可以通过简化模型法分析, 首先考虑四臂螺旋天线结构的是旋转对称性, 两条相对应的螺旋臂看成是一个双臂螺旋, 这样就可以将其分解成两组正交放置, 相位相差  $90^\circ$  的双臂螺旋结构。由于双臂螺旋上的电流幅度符合正弦曲线变化, 其中电流极值位于馈电点和顶端, 零点则位于螺旋臂中部, 将每条螺旋臂简化成垂直的直线和水平的圆环, 则其圆环在径向部分所在的平面上, 偶极子则垂直于该平面, 因此双臂螺旋结构可以等效成用环—偶极子模型, 通过分析正交放置, 相位相差  $90^\circ$  的环—偶极子组合来分析四臂螺旋天线的辐射场。通常四臂螺旋天线研究主要集中在天线的宽波束特性, 通过调整螺旋参数, 实现赋形圆锥波束辐射, 其波束宽度可达到  $100 \sim 240^\circ$ 。但对四臂螺旋天线的全向辐射特性研究报道很少。

### 1.3 四臂螺旋天线馈电方式

由于四臂螺旋天线的四根螺旋线幅度相位分布的特点, 其馈电方式包括自相移馈电和外设的功分移相一体化网络馈电两种方式。自移向馈电<sup>[14-16]</sup>是通过改变相邻螺旋臂的长度的方式, 使相邻的螺旋臂来产生  $90^\circ$  相位差; 同时通过

缝隙巴伦实现同轴线馈电时的不平衡—平衡转变。具体实现方式是将四臂螺旋天线看成两个正交放置的双臂螺旋天线，为以标准的谐振长度为中心，调节的两个双臂螺旋的臂长，相邻的螺旋臂一长一短，这样两端的输入阻抗一个呈容性一个呈感性，长度调节合适就会形成  $90^\circ$  差；而巴伦会给两个双臂螺旋分别提供相位  $0^\circ$  和  $180^\circ$ 、幅度相等的激励信号，借此其最终能实现等幅正交馈电。外设的功分移相一体化网络则是把功率分配和相位偏移功能集成到一起的网络，该网络为五端口网络，4 个输出端口需满足幅度相等，相对相位关系为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$ 。外设的功分移相一体化网络的原理是由功分器、移相器和耦合器等进行级联，网络支路端口的幅度和相位分布。实现形式有多种，包括串馈式馈电网络<sup>[17]</sup>、威尔金森功分器加移向传输线网络<sup>[18]</sup>、3 dB 电桥级联而成的馈电网络<sup>[19-20]</sup>以及威尔金森功分器和 3 dB 电桥混合级联网络等。

## 2 天线结构与与设计

### 2.1 四臂螺旋天线设计

本文在四臂螺旋天线方向图的宽波束特性进一步探索，分析了四臂螺旋的螺距对方向图的影响。可知当螺距大于一个波长时，天线的最大辐射方向会逐渐趋向于螺旋结构的法线方向。优化螺旋线结构参数，最终实现天线的全向辐射。本文提出的天线结构如图 3 所示，其螺旋线采用金属涂层结构，通过激光直写式 3D 打印技术将金属涂层印制在介质筒上，介质筒材料采用玻纤聚氰酸酯复合材料。玻纤聚氰酸酯复合材料具有高强度高模量和低密度的特点，又是良好的介电材料能透过电磁波，耐腐蚀性和耐紫外线性能良好，是航空航天使用的理想增强材料之一。该材料成型技术相对比较复杂，通常采用热压罐固化成型法。在介质筒制做时，根据介质筒尺寸制作模具，玻纤维预浸料采用等层间角度间隔设计方案，按照模具刻线对不同角度的预浸料在模具上进行铺覆。在铺覆过程中，要求预浸料无褶皱、架桥、搭接、缺失等情况。通过热压罐中固化最终成型，完成介质支撑的的制备。传统的曲面图案制造方式先在平面上制备导电图形，然后通过转印等工艺再将导电图形印制在三维基体表面之上，或者使用整体电镀+激光烧蚀等方式直接在基体表面制备导电图形。这些方法普遍存在工艺复杂、耗时长、复合材料基体受损伤等问题。直写式 3D 打印技术的是通过 3D 打印技术在曲面上制备的

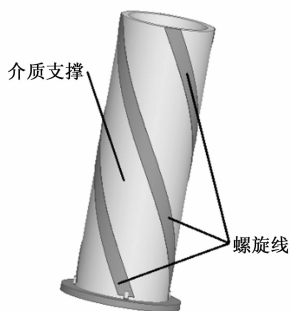


图 3 四臂螺旋模型示意图

具有导电特性的特定图形。该技术金属涂层制备周期短，对原材料基体无损伤，空间利用率高，实现的金属图形能与基体结构实现高度融合和集成。对天线参数进行优化设计，最终确定天线的螺距为  $p=170$  mm，天线直径为  $r_0=15$  mm，螺旋线宽度  $w=3$  mm，螺旋圈数为  $n=0.5$ ，天线通过下端馈电，天线顶部为开路。四根螺旋线激励信号幅度相等，相对相位依次为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$ 。天线方向图仿真结果如图 4 所示，由计算结果可知，四臂螺旋结构的最大辐射方向为水平面方向，具有良好的全向辐射特性。

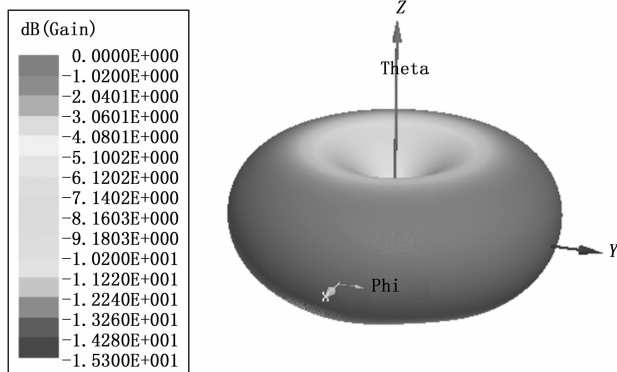


图 4 天线三维方向图计算结果

### 2.2 馈电网络设计

对比多种四臂螺旋天线的外设馈电实现方式，天线的馈电网络采用基于威尔金森功分器的功分移相一体化网络。该网络常规设计由 3 个二等分微带威尔金森功分器和 3 段微带传输线组成。微带二等分线威尔金森功率分配器是最简单的二等分功分网络，其结构如图 5 所示。威尔金森功分器输入端和输出端特性阻抗均为  $Z_0$ ，输入端和数传端分支特性阻抗为  $Z_1$ ， $Z_1=\sqrt{2}Z_0$ ，长度为  $\lambda_g/4$ ， $\lambda_g$  微带线结构中的介质波长，两输出端之间跨接有阻值为  $2Z_0$  的隔离电阻，隔离电阻焊接在微带线上。由于通信系统中天线的阻抗要求为  $50 \Omega$ ，因此通常威尔金森功分器端口特性阻抗  $Z_0$  为  $50 \Omega$ ，隔离电阻  $2Z_0$  为  $100 \Omega$ 。信号从端口 1 输入时，从端口 2 和端口 3 等功率输出。端口 2 和端口 3 之间互相隔离。为实现四根螺旋线依次相位  $90^\circ$  馈电，通过在威尔金森功分器其中一支路增加一定长度传输线的方式，实现两支路产生需要的相位差。具体实现方式为在馈电点的功分器一支路增加相位为  $180^\circ$  的微带传输线，在连接螺旋线的端口的功分器一支路增加相位为  $90^\circ$  的微带传输线，实现 4 个支路端相对相位分别为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$ 。由于移向传输线的引入，馈电网络和端口到两个支路端口微带线的微带线路径损耗存在差异，造成功分器两支路的功率输出存在差异。为改善这一情况，对两支路的微带线宽度微小调整，实现对两支路端口的幅度差异的进行补偿。馈电网络采用厚度为 1 mm 的 RHC350 微波介质板，该介质板基材为环氧玻纤特氟龙复合材料，其介电常数为 3.5，损耗角正切为 0.002。考虑天线的小型化需求，在功分移相一体化网

络设计时优化微带线的布局, 减小馈电网络的总面积, 馈电网络结构示意图如图 6 所示。完成微带线布线后, 对馈电网络进行了优化设计, 最终微带网络印制板直径仅为 60 mm。

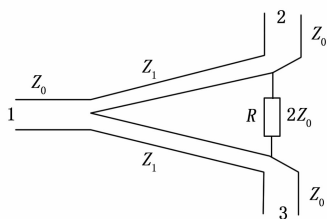


图 5 威尔金森网络结构图

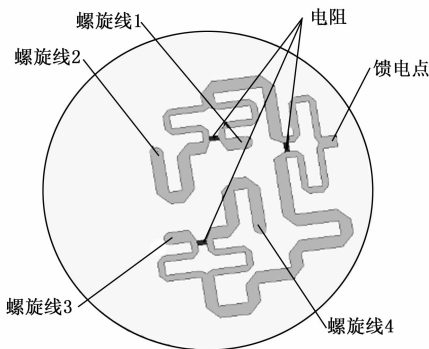


图 6 网络示意图

### 2.3 天线整体设计

根据四臂螺旋和馈电网络的设计结果, 建立全向圆极化天线模型, 进行整体优化设计。四根螺旋线下端通过馈电网络的介质板上的金属化过孔与馈电网络的 4 个支路端口连接, 天线整体结构如图 7 所示。天线的方向图计算结果如图 8 和图 9 所示。与四臂螺旋结构的方向图相比, 天线的最大辐射方向为水平面方向, 保持了良好的全向辐射特性。但由于馈电网络各端口幅度和相位分布与理论分布存在一定差异的影响, 天线方向图的波束均匀性产生一定恶化, 由计算结果可知天线的波圆度小于 0.7 dB。



图 7 天线模型示意图

## 3 测试结果与分析

### 3.1 天线样机加工

根据计算设计结果, 加工制作了四臂螺旋结构。首先

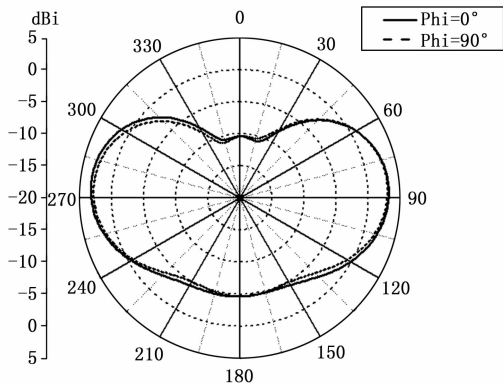


图 8 天线计算垂直面方向图

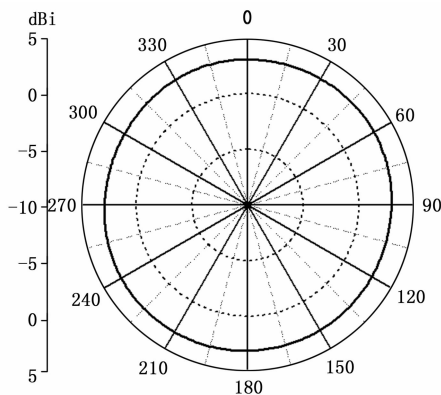


图 9 天线计算水平面方向图

加工了玻纤聚碳酸酯复合材料支撑筒, 然后通过直写式 3D 打印技术在支撑筒表面上进行金属螺旋线的加工; 采用微波介质板加工制作了功分移相一体化馈电网络, 馈电网络的 4 个支路端口有金属过孔。为提高网络的环境耐受性, 对微带馈电网络的铜箔进行了表面处理, 处理工艺采用沉锡工艺。沉锡工艺是基于金属铜和溶液中的锡离子的置换反应, 在铜箔表面形成平坦的铜锡合金化合物, 该工艺提高馈电网络的焊接可靠性, 同时又能对铜箔起到防氧化、防腐蚀的作用。零件加工完成后, 对全向圆极化天线进行了整体装配, 螺旋结构的四根螺旋线通过穿过 4 个支路端口的过孔的铜探针焊接在一起。在馈电网络馈电点处焊接了用于测试的电缆和 SMA 同轴接插件。天线样机如图 10 所示。

### 3.2 天线样机测试方法

天线装配完成后, 采用 Agilent E5071C 矢量网络分析仪和天线自动测试系统在微波暗室中对天线样机的电性能(电压驻波比、增益方向图和轴比等特性)进行了测试。

#### 3.2.1 电压驻波比测试

通过矢量网络分析仪对全向圆极化天线的电压驻波比测试。测试前预先打开矢量网络分析仪进行预热; 状态稳定后, 设置起始终止频率, 进入校准界面, 按顺序将开路、短路和负载校准件依次连接到仪器端口进行校准; 校

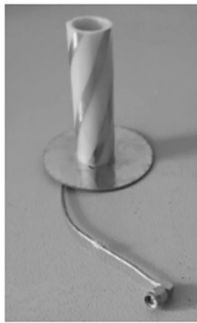


图 10 天线样机照片

准完成后, 将天线连接到仪器端口, 可直接测试出天线的电压驻波比曲线, 将电压驻波比数据存储在矢量网络分析仪中。

### 3.2.2 方向图测试

天线的方向图测试采用场地远场法测试。远场法测试测试天线方向图时, 收发天线之间的测试距离满足远场测试距离条件, 即收发天线之间的距离  $R$  满足下式:

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2)$$

式中,  $R$  为收发天线之间的距离;  $\lambda$  为工作波长;  $D$  为待测天线口径 (天线为天线最大线尺寸)。

根据天线的远场距离, 在微波暗室中搭建测试环境, 发射天线采用性能参数已知的标准喇叭天线。标准喇叭天线为线极化天线, 其极化方向与窄边平行 ( $H$  面喇叭), 具有结构简单, 便于安装的特点。全向圆极化天线固定在接收转台上。标准喇叭天线与全向圆极化天线架设高度相等, 距离 5 m, 远大于远场距离。天线架设完成后, 标准喇叭天线与自动测试系统的信号源连接, 全向圆极化天线与测试系统的频谱仪连接。完成测试环境搭建后, 启动自动测试系统, 沿水平方向转动圆极化全向天线, 使天线波束中心对准信标塔的源天线。依据天线测试要求以及天线转动速度, 合理设置频谱仪的工作状态等; 将全向圆极化天线转动一周, 频谱仪实时记录待测天线的方位方向图, 并将记录曲线存储在测试系统的电脑中, 即得到天线的方向图测试结果。改换测试频率, 重复上述步骤可测得其它频率点的天线方向图。

由于利用线极化天线测试圆极化天线方向图时存在极化失配, 因此需做一定的处理才能得到天线的增益。具体做法是, 分别测出发射天线处于水平极化和垂直极化时的两组数据, 水平极化和垂直极化信号在空间是相互正交的, 通过测试系统对两组增益数据进行处理合成, 即可得到圆极化天线的方向图。得到方向图后, 通过测试系统对天线方向图进行积分计算, 即可得到天线的增益。

### 3.2.3 轴比测试

根据天线的远场距离, 在微波暗室中搭建测试环境进行轴比测试, 发射天线采用性能参数已知的标准喇叭天线。标准喇叭天线和全向圆极化天线分别固定在发射和接收转

台上, 加电预热使测试系统仪器设备工作正常; 转动全向圆极化天线对准标准喇叭天线, 使其在同一直线上。合理设置频谱仪的状态参数, 通过测试系统驱动标准喇叭天线轴线绕其轴线进行转动, 转动范围大于  $180^\circ$ , 通过测试系统的频谱分析仪记录信号电平的变化; 利用频谱分析仪的 Marker 功能, 读取所测曲线的最大值为  $P_{\max}$  (dBm), 最小值为  $P_{\min}$  (dBm), 则根据下式计算出待测天线的轴比。

$$AR = P_{\max} - P_{\min} \quad (3)$$

重复上述步骤可测得其它频率点的轴比结果。

### 3.3 测试结果分析

根据上述测试方法对全向圆极化的电压驻波比、方向图、增益和轴比进行了测试。图 11 给出天线的电压驻波比计算与测试结果, 其中实线为计算结果, 虚线为测试结果。由图可知, 计算结果和实测结果两条曲线的趋势基本一致, 天线在 2~2.25 GHz 频带范围内电压驻波比小于 1.6。可知该天线在带宽内具有良好的阻抗特性。但从该频段内的曲线的起伏程度看, 测试结果与计算结果有一定的差异。这是由于天线在装配时, 馈电网络的支路端口与四臂螺旋结构的螺旋螺旋线通过铜探针焊接在一起, 由于装配误差的影响, 4 根探针焊接状态存在差异, 并不能完全实现计算模型中连接结构的结构, 所以对天线电压驻波比性能造成了影响。

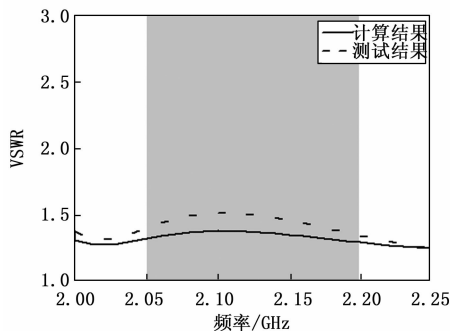


图 11 计算与测试电压驻波比

图 12 和图 13 给出了天线在中心频率的垂直面和水平面的测试方向图。由天线的实测方向图可知, 天线的最大辐射方向在天线的水平面, 天线水平面方向图不圆度小于 1.2 dB, 表明该天线具有良好的全向圆极化特性。但与计算结果相比, 天线的方向图的均匀性和不圆度均略有差异。经过分析引起方向图性能出现差异的主要是两个原因, 第一个原因是由于馈电网络为不等分网络, 两支路的微带线宽差值仅为 0.2 mm, 由于微带印制板加工精度限制, 支路线宽与设计尺寸存在微小误差, 会对支路的端口幅度分布产生影响; 第二个原因是四臂螺旋结构的氰酸酯复合材料支撑筒成型后未进行二次加工, 存在壁厚不均匀的现象。由于不同的壁厚对螺旋线的介质加载效应不同, 会对螺旋线上的电流分布产生影响。图 14 和图 15 分别给出了天线增益和轴比计算和测试结果。测试结果表明天线在工作带宽内增益大于 1.7 dBi, 轴比小于 3 dB, 测试与计算结果存在

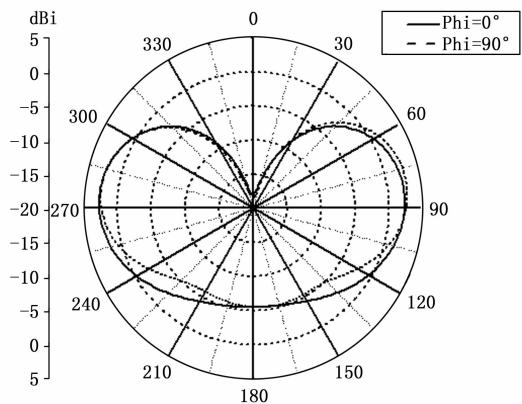


图 12 天线垂直面测试方向图

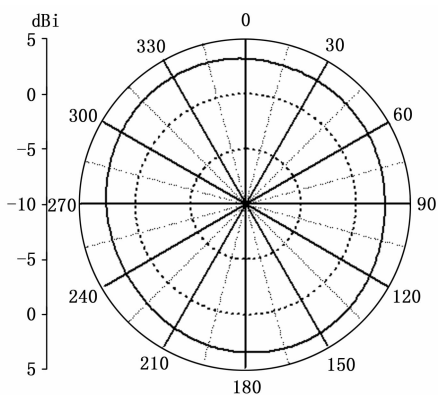


图 13 天线水平面测试方向图

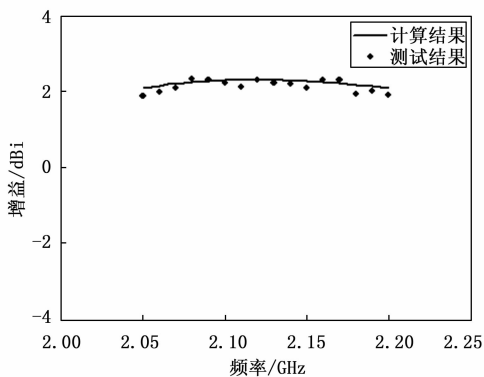


图 14 计算与测试增益

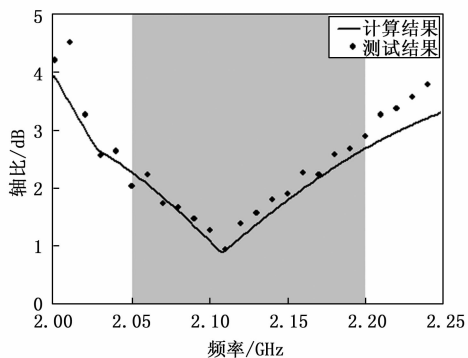


图 15 计算与测试轴比

差异但基本吻合。由测试结果可知该天线具有良好的全向圆极化辐射特性, 在阻抗带宽内具有稳定的增益特性和轴比特性。

#### 4 结束语

本文通过对长螺距四臂螺旋天线辐射特性的分析, 设计了一种工作在 S 频段的全向圆极化天线, 通过螺距为 1.2 倍中心频率波长的长螺距的四臂螺旋天线结构实现全向圆极化辐射, 采用微带功分移相一体化网络对四根螺旋臂进行激励, 激励信号幅度相等, 相对相位为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$ 。根据计算结果通过激光直写式 3D 打印技术制作了天线样机。从实测结果可以看出采用外设馈电网络的长螺距四臂螺旋天线, 用简单结构实现了天线全向圆极化辐射特性, 天线电压驻波比在 2~2.25 GHz 频带范围内电压驻波比小于 1.6, 在工作带宽内增益大于 1.7 dBi, 轴比小于 3 dB, 水平面方向图不圆度小于 1.2 dB。该天线为某工程项目的电气原理样机, 测试结果均满足使用需求。为面向工程应用, 后续将会开展工程适应性设计, 包括装联工艺、安装载体对天线性能的影响分析和结构可靠性、可加工性设计。该天线具有结构紧凑、体积小、重量轻、易加工装配等优点, 是一种性能优越的全向圆极化天线。该天线方案中相关技术还可应用于线极化全向天线, 在移动通信、雷达、频谱监测、遥测遥感, 射电天文及电视广播等方面有着非常广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 杨家玮, 李建东. 个人通信 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [2] 陈 宁. 一种机载通信天线设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (12): 4164-4167.
- [3] 潘高峰, 薛 军, 梁 盛. 单极 X 频段小型化天线的设计与互扰仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 2 (12): 200-202.
- [4] YU Y, SHEN Z, HE S. Compact omnidirectional antenna of circular polarization [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 1466-1469.
- [5] QUAN X, LI R, TENTZERIS M M. A broadband omnidirectional circularly polarized antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61 (5): 2363-2370.
- [6] PAN Y, LEUNG K W. Wideband circularly polarized dielectric bird-nest antenna with conical radiation pattern [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61 (2): 563-570.
- [7] ZHENG G Q, SUN B H. High gain normal mode omnidirectional circularly polarized antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17 (6): 1104-1108.
- [8] CAI Y M, GAO S, YIN Y, et al. Compact-size low-profile wideband circularly polarized omnidirectional patch antenna with reconfigurable polarizations [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64 (5): 2016-2021.

(下转第 235 页)