

# 一种宽带高增益全向赋形测控天线的设计与实现

李霞<sup>1</sup>, 韩来望<sup>2</sup>, 李勋<sup>1</sup>

(1 天津航天中为数据系统科技有限公司 天津 300301

2 天津津航技术物理研究所 天津 300308)

**摘要:** 为满足无人机地面测控站在单天线工作模式下实现遥控、遥测链路的远距离、大仰角跨度的全方位通信, 设计了一种宽带高增益全向波束赋形阵列天线。天线采用宽带印刷偶极子单元组成 4 元共轴线阵, 通过并联耦合馈电的方式在 28.9% 的相对工作带宽内增益大于 6 dB, 同时采用遗传优化算法在 1.65 GHz~1.75 GHz 频带内进行俯仰波束赋形, 使得第一零点增益  $\geq -8$  dB, 从而实现宽角域的链路覆盖。

**关键词:** 宽带; 高增益; 全向; 波束赋形; 测控通信

中图分类号: TN823.15 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)04-0008-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210511002

**引用格式:** 李霞, 韩来望, 李勋. 一种宽带高增益全向赋形测控天线的设计与实现[J/OL]. 遥测遥控, 2021, 42(4): 76-81[20XX-XX-XX]. <http://ycyk.brit.com.cn/ycyk/article/abstract/20210511002>.

## Design and realization of a wideband high gain omnidirectional shaped-beam TT & C antenna

LI Xia<sup>1</sup>, HAN Laiwang<sup>2</sup>, LI Xun<sup>1</sup>

(1. Tianjin Aerospace Zhongwei Data System Technology Co., Ltd., Tianjin 300301, China;

2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** To meet the requirements of UAV ground TT&C station to achieve far-distance and large-elevation span omnidirectional communication with the single-antenna operating mode, a wideband high-gain omnidirectional beamforming array antenna is designed. The antenna adopts four broadband printed dipole units to form a coaxial array, by making use of parallel and coupling feeding method, the gain of the antenna is larger than 6 dB within 28.9% of the relative working bandwidth. At the same time, the genetic optimization algorithm is used for the beamforming of elevation plane in 1.65 GHz~1.75 GHz, realizing the first null no less than  $-8$  dB, which achieving the link's wide-angle coverage.

**Key words:** Wideband; High gain; Omnidirectional; Beamforming; TT & C communication

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20210511002

**Citation:** LI Xia, HAN Laiwang, LI Xun. Design and realization of a wideband high gain omnidirectional shaped-beam TT & C antenna [J/OL]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(4): 76-81[20XX-XX-XX]. <http://ycyk.brit.com.cn/ycyk/article/abstract/20210511002>.

## 引 言

地面测控站作为无人机测控通信系统的重要组成部分, 正逐步向着车载、便携、轻量化发展, 全向天线凭借其在方位面全向波束覆盖和俯仰面宽波束覆盖的优势, 在地面终端设备中广泛应用。在测控通信系统中, 由于机载应用环境和安装空间的限制, 无人机机载天线普遍采用体积小、重量轻、低风阻的低增益全向天线, 因此, 通过提高地面天线增益, 可以在不增加机载测控设备功耗的条件下, 有效提升链路的测控通信距离<sup>[1]</sup>。测控通信系统的通信体制与天线特性紧密相连, 在频分双工的通信系统中, 通过采用单天线工作模式覆盖上行和下行链路的工作频段, 可在实现地面终端设备轻量化的同时降低设备

成本,这对终端天线的宽频带特性提出了更高的要求。

宽频带高增益的全向天线以其独特的工作特性和潜在的技术优势,在测控通信、移动通信基站等领域得到广泛应用和研究。文献[2]设计了一种具有弯曲馈线的双面印刷高增益全向天线,采用双面印刷金属贴片的阵列形式,结合电磁耦合馈电在一定程度上拓展了天线的带宽,降低了天线最大辐射方向随频点不同而变化的不利影响,但该阵列天线仅在12%的工作频带内最小增益为4 dBi,难以满足宽频带通信系统的应用需求。文献[3]提出了一种耦合馈电的印刷半波偶极子天线单元,利用寄生套筒结构实现平衡馈电的同时展宽了天线的带宽,实现了36%的工作宽带。

为满足无人机地面测控站在单天线工作模式下实现遥控、遥测链路的远距离、大仰角跨度的全方位通信,基于文献[3]中的宽带单元设计了一种宽带高增益全向波束赋形阵列天线,通过采用并联耦合馈电的方式对4元共轴线阵进行馈电,实现了在28.9%的工作带宽内增益大于6 dB的宽带高增益特性,同时为了确保上行链路的宽角域覆盖,对阵列俯仰面方向图进行基于遗传算法的波束零点填充,在遥控频段内方向图第一零点增益填充到-8 dB。

## 1 阵列天线设计

### 1.1 设计原理

宽带全向天线的高增益设计实现最有效的方法是,采用宽带全向天线单元以一定方式组成共轴线阵,通过减小俯仰面方向图的波束宽度来达到提高增益的目的。根据馈电方式的不同,组阵方式主要有串联馈电和并联馈电形式,其中,串联馈电的馈电网络结构简单,但阵列中各个阵元的相位会随着工作频点的不同有一定的差异,从而导致波束的指向随着频点的改变产生扫描,因此,这种馈电方式的全向天线方向图带宽较窄;并联馈电相比于串联馈电需要采用较复杂的功分网络来实现对各阵元所需相位的馈电,从而克服了串联馈电导致的波束指向随频率发生变化的问题<sup>[4]</sup>。因此,采用并联馈电的方式对阵列单元和馈电网络进行合理的一体化设计,可实现宽频带工作的同时适当降低天线结构的复杂度。

线阵根据其最大辐射方向主要分为边射阵和端射阵,本文采用最大辐射方向垂直于阵直线的直线阵,以半波振子为阵元的 $N$ 元边射阵辐射方向图可表示为式(1),其中, $d$ 表示单元间距;利用该方向图函数可由式(2)估算出阵列的方向系数,当单元间距取 $\lambda/2$ 时,可估算出4个单元组成边射阵的方向系数约8 dB。

$$F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta} \times \frac{\sin\left(\frac{N}{2}kd\cos\theta\right)}{N\sin\left(\frac{1}{2}kd\cos\theta\right)} \quad (1)$$

$$D = \frac{2}{\int_0^\pi (F(\theta))^2 \sin\theta d\theta} \quad (2)$$

在阵列天线中,天线方向图的主瓣宽度、旁瓣高度等特性与阵列天线的零点息息相关。下面通过分析阵列天线零点控制的基本原理<sup>[5]</sup>,进而寻求实现方向图零点填充的方法。对于 $N$ 元各项同性点源组成的线阵,其与阵列排列方向平行面上的电场方向图可以写为:

$$E(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} A(M_i, \varphi_i) \exp(jikd \sin(\theta)) \quad (3)$$

式中, $A(M_i, \varphi_i)$ 表示第 $i$ 个单元的激励信号, $d$ 表示相邻两个单元之间的距离。假设 $Z = \exp(-jkd \sin\theta)$ ,则式(3)可以写成:

$$E(\theta) = Z^{-(N-1)} \sum_{i=0}^{N-1} A(M_i, \varphi_i) Z^{N-1-i} \quad (4)$$

当 $A(M_i, \varphi_i) \neq 0$ 时,该式是一个典型的一元次多项式,令 $A(M_i, \varphi_i) = 1$ ,根据多项式的性质,式(4)在复数域可以因式分解成:

$$E(z) = CZ^{-(N-1)} \prod_{m=1}^{N-1} (Z - Z_m) \quad (5)$$

式中,  $C$  是系数,  $Z_m$  是一元  $N-1$  次方程的根, 且  $Z_m$  是复数。

$$Z^{-(N-1)} \sum_{i=0}^{N-1} A(M_i, \varphi_i) Z^{N-1-i} = 0 \quad (6)$$

由于  $Z_m$  是式 (6) 的根, 则  $E(Z_m)=0$ , 即  $Z_m$  是阵列方向图上的零点, 对于  $N$  元阵列最多可以形成  $N-1$  个零点。  $Z_m$  用指数方式表示为  $Z_m = \alpha_m \exp(-j\beta_m)$ , 同时令:

$$\mathbf{a} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N-1}] \quad (7)$$

$$\mathbf{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N-1}] \quad (8)$$

则阵列天线的零点为:

$$\mathbf{Z} = [Z_1, Z_2, \dots, Z_{N-1}] \quad (9)$$

当  $\alpha_m=1$  时, 阵列方向图在  $\theta_m = \arcsin(\beta_m/(kd))$  角度上存在深度为  $-\infty$  的零点, 通过调节  $\alpha_m$  的大小可以改变对应零点的深度; 将  $\mathbf{Z}$  带入式 (5) 展开即可求得所需零点位置和零点深度所对应的每个单元的激励幅度和相位权值。

## 1.2 阵列单元设计

为实现阵列天线宽带、高增益全向特性的设计要求, 需要采用具有宽频带、全向辐射特性的阵列单元形式, 同时具备易于组阵的特点。本文选用便于加工、可靠性高的印刷偶极子天线形式作为阵列单元, 由其构成的二元子阵结构如图 1 所示, 偶极子的辐射臂位于介质板 ( $\epsilon_r=2.2$ ,  $h=1.524$  mm) 的顶层, 并与馈线的地连接; 位于介质板顶层的双枝节微带馈线通过电磁耦合的方式, 对偶极子单元馈电以实现其宽频带工作, 同时通过在馈线地板两侧对称地印制两个辐射单元, 以消除馈线对辐射特性的影响; 为了进一步展宽天线的阻抗带宽, 从套筒天线的宽带工作原理出发, 在天线辐射单元外部添加一个与之同轴的寄生套筒, 通过与天线辐射振子之间的耦合可有效展宽带宽, 同时, 套筒结构起到屏蔽巴伦的作用, 有效减小非平衡电流对辐射特性造成的影响。在二元子阵列中, 与两个阵列元连接的 T 形地结构可有效减小单元之间的耦合。经过仿真优化, 阵列单元的主要参数为:  $Wg=12$  mm,  $Wd=5.5$  mm,  $g=6$  mm,  $Wtr=8.5$  mm,  $Ld=54$  mm,  $Lt=56$  mm,  $Lv=43$  mm,  $Dv=40$  mm。

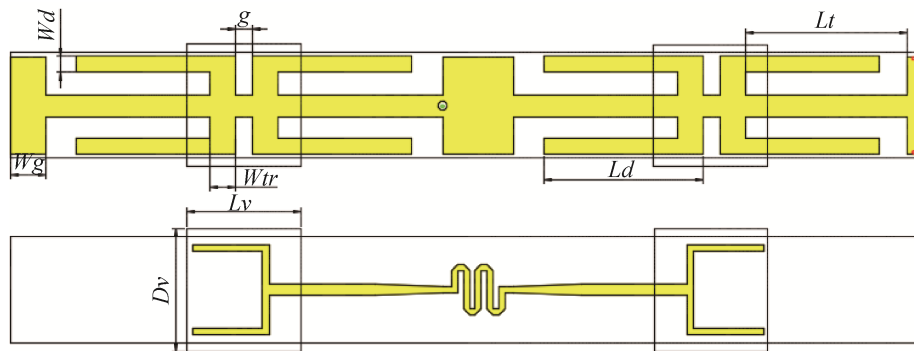


图 1 二元天线阵列结构  
Fig. 1 Structure of 1×2 antenna array

## 1.3 波束赋形设计

为避免高增益全向天线俯仰面方向图的零点导致该角域通信链路的闪断, 同时兼顾飞机的安全飞行和波束赋形的方向图带宽问题, 对上行链路工作频段的上半空间方向图进行零点填充, 以提高链路的宽角域覆盖性能。根据主波束方向和零点辐射方向链路对增益的需求, 最大增益大于 6 dB, 第一零点增益大于 -8 dB, 第二零点增益大于 -15 dB, 同时兼顾下旁瓣抑制以增加上半空间辐射能量。波束赋形的设计思路是把所需求的波形抽象为以阵元激励的幅度和相位为基本变量的数学模型, 即目标函数, 通过优化算

法求得数学模型的最优解。基于遗传算法的阵列天线波束赋形是一种有效的技术途径，该算法的主要过程有<sup>[6]</sup>：① 变量编码：将一定范围内实数类型的自变量进行离散抽样量化；② 初始化：对控制参数和种群初始化；③ 遗传操作：包括复制、交叉、变异等过程。

利用遗传算法进行波束赋形的关键是目标函数和适应度函数的选择，根据波束赋形要求，本文选取余割平方函数作为目标函数对4元线阵的激励相位进行优化迭代，如图2所示；针对所需优化方向图的增益 $G$ 、上旁瓣第一零点 $NULL_1$ 、上旁瓣第二零点 $NULL_2$ 、下旁瓣电平 $SLL$ 等指标，构造适应度函数为：

$$Fit = -\max \{a_1(G - G_0), a_2(NULL_1 - NULL_{01}), a_3(NULL_2 - NULL_{02}), a_4(SLL - SLL_0)\} \quad (10)$$

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1 \quad (11)$$

式中， $G_0$ 、 $NULL_{01}$ 、 $NULL_{02}$ 、 $SLL_0$ 分别为指标的优化目标值， $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 为调整不同参数变化对目标函数贡献大小的权值系数。通过利用上述算法计算出每个单元的激励相位，然后带入 Ansoft HFSS 所建模型中进一步考虑单元间互耦等因素进行参数优化，可实现波束赋形工程化设计。

### 1.4 馈电网络设计

并联馈电的组阵形式可避免波束最大指向随频率变化，从而展宽方向图带宽，同时通过对馈电网络的合理布局可减小其对全向天线不圆度的影响。本文设计的线阵馈电网络的拓扑结构如图3所示。在本文的设计中，功分移相网络放置在线阵的中部，阵列馈电端口通过同轴线1与等分功分器的输入口连接，两路输出分别通过同轴线2和同轴线3对上下两个子阵列馈电，同时功分器底层的地通过金属化过孔与顶层阵列单元的T形地结构连接，实现了馈电网络的一体化设计。子阵列1和子阵列2分别由2个阵元等间距构成，均利用蛇形线和微带枝节对其进行并联等幅馈电，各单元的激励相位通过调节功分器输出端口的相位和子阵列中蛇形线的长度来实现。

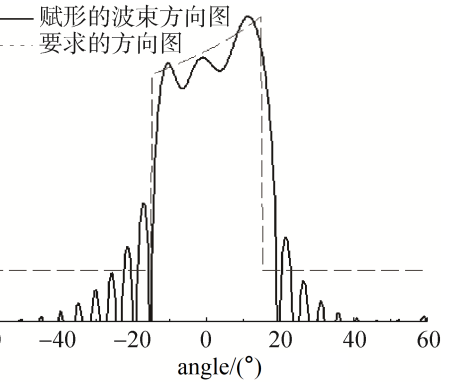


图2 波束赋形目标方向图  
Fig. 2 Objective pattern of beamforming

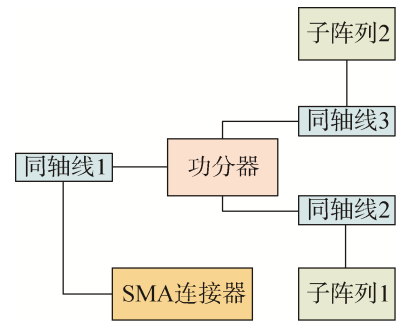


图3 馈电网络的拓扑结构  
Fig. 3 The topology of the feed network

## 2 天线仿真与实现

根据上文所述设计思路，结合实际工程应用中天线安装底座、天线罩、安装螺钉等结构对天线性能的影响，在 Ansoft HFSS 电磁仿真软件中建立如图4所示的仿真模型。将遗传算法优化所得各单元激励相位作为波束赋形优化的初始参数，通过调节单元结构参数、单元间距和各单元的馈线长度等参数，对阵列的电压驻波比、增益、第一和第二零点增益等指标进行优化仿真，对满足设计指标的模型进行加工的实物如图5所示，天线尺寸为



图4 阵列天线仿真模型  
Fig. 4 Simulation model of array antenna



图5 天线实物图  
Fig. 5 Photograph of the proposed antenna

为

Φ83×684 mm。

在微波暗室中对天线的方向图和回波损耗进行测量, 由矢量网络分析仪测得天线馈电端口的 S11 和仿真数据如图 6 所示, 从图中可看出仿真 S11 与实测数据一致性较好, 满足宽带工作的要求。各频点的仿真与实测 E 面、H 面方向图分别如图 7 和图 8 所示, 从中可看出天线在 1.3 GHz~ 1.75 GHz 的工作频带内具有良好的高增益全向的辐射性能, 在 1.65 GHz~1.75 GHz 的频带内实现了 E 面方向图第一零点和第二零点的有效填充, 第一零点增益 ≥-8 dB, 第二零点增益 ≥-15 dB。

### 3 结束语

本文提出了一种实现宽带高增益全向测控地面站天线的设计实现方法, 通过采用宽带偶极子天线单元组成 4 元线阵, 利用遗传算法对阵列 E 面方向图进行波束赋形, 同时结合并联耦合馈电的一体化馈电网络对天线单元进行激励, 实现了天线在 28.9% 的相对工作带宽内具有全向高增益的性能, 同时在链路遥控频带内的 E 面方向图零点得到有效填充, 充分验证了文中所用设计方法的有效性, 该天线的设计与应用可有效拓展测控通信链路的覆盖包络。

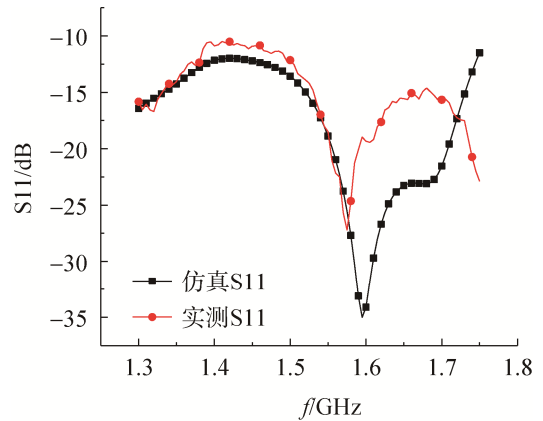


图 6 仿真和实测的 S11

Fig. 6 Simulation and measurement of S11

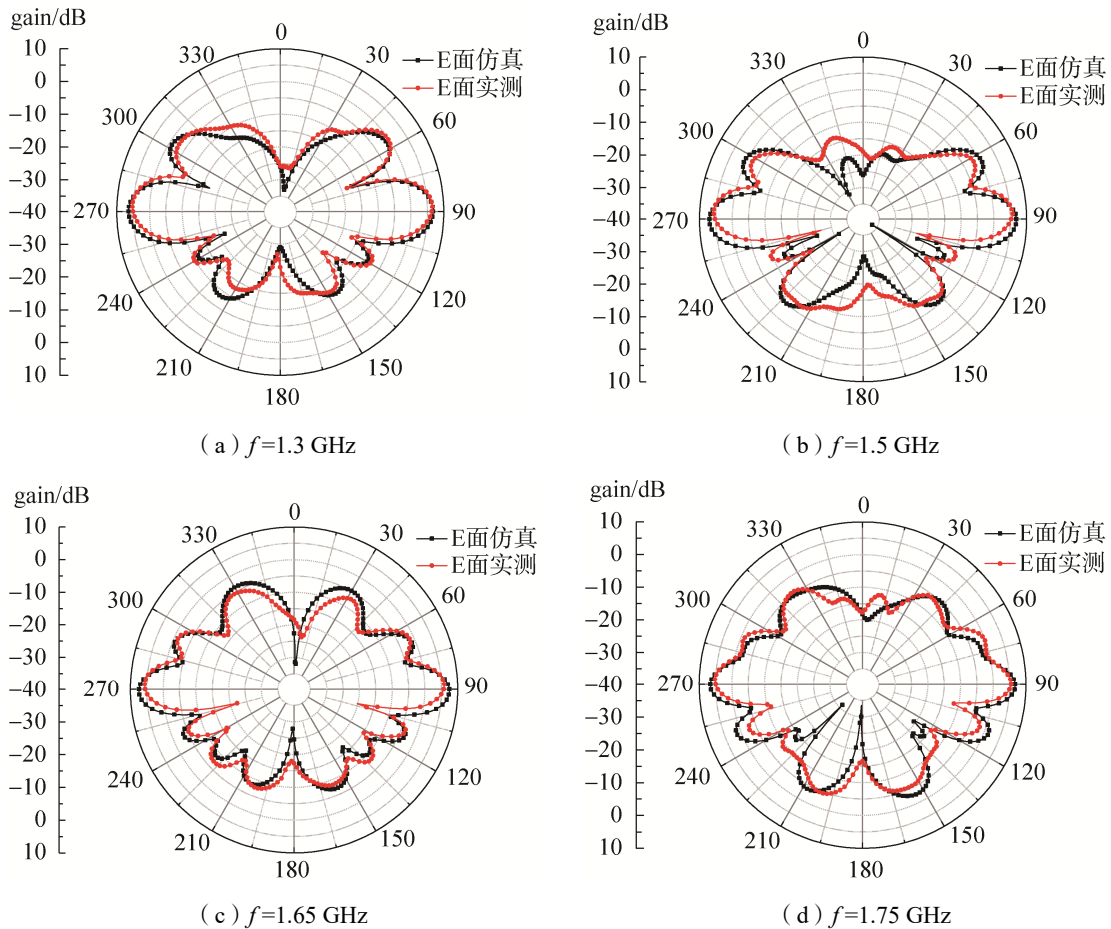


图 7 仿真和实测 E 面方向图

Fig. 7 Simulation and measurement of E plane pattern

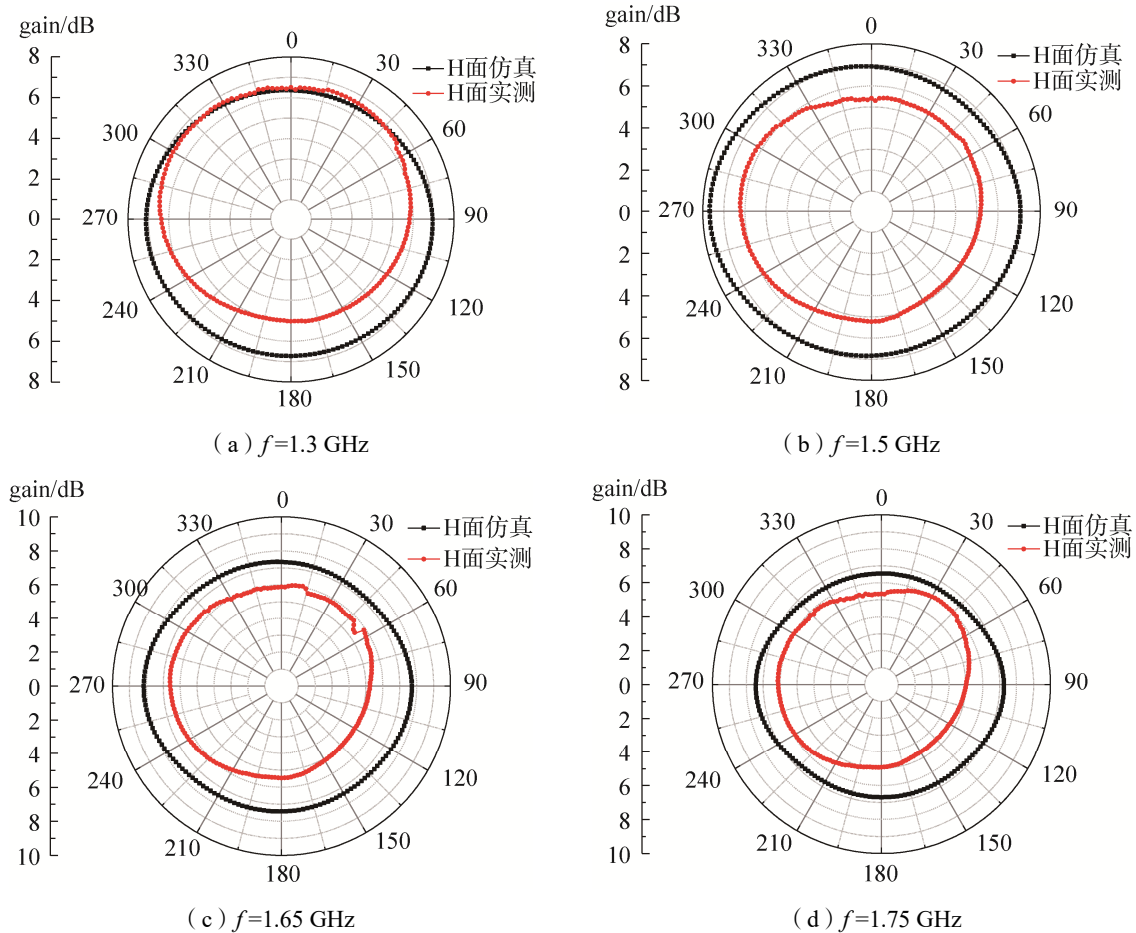


图 8 仿真和实测 H 面方向图

Fig. 8 Simulation and measurement of H plane pattern

## 参考文献

- [1] 周越. 无人机测控阵列天线组阵技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [2] 王波, 梁艺, 李耀敏. 新型 L 频段高增益全向天线[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(5): 55-58.  
WANG Bo, LIANG Yi, LI Yaomin. New L-band omni-directional micro-strip array antenna with high gain[J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(5): 55-58.
- [3] CHENG H, YANG X, SONG Q. Design of an improved high-gain omnidirectional printed dipole antenna[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband, Nanjing, IEEE, 2016: 1-4.
- [4] 刘璐. 高增益宽频带全向印刷天线研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [5] 彭政谕. 阵列天线波束赋形技术研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [6] 李由. 移动基站宽带天线及波束赋形研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

## [作者简介]

李霞 1987年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人机测控通信天线设计和射频电路设计。

韩来望 1987年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为信号与信息处理。

李勋 1990年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人机测控通信天线设计。