

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904757

基于小型无人机的高精度天线测试方法研究^{*}

马松辉, 芦永超, 刘可佳, 郭淑霞, 胡楚锋

(西北工业大学 无人机特种技术重点实验室 西安 710065)

摘要: 天线测试对于天线辐射性能的检验至关重要。而当天线的尺寸较大或测试频率较低时, 传统的天线测试方法难以满足测试需求。以大型天线测试为研究背景, 研究了一种基于小型无人机的天线测试方法, 根据测试信道模型获取被测天线的增益方向图。与传统的利用 GPS 作为无人机的导航信号相比, 采用实时差分 GPS 作为无人机的导航信号, 结合几何控制方法精确控制无人机的飞行轨迹, 无人机的飞行轨迹偏差小于 0.1 m。对测试方法进行了试验验证, 结果表明采用该方法可以较为准确地测量天线的方向图, 增益测试误差小于 1 dB, 具有较高的工程应用价值。

关键词: 大型天线测试; 小型无人机; 实时差分 GPS; 几何控制方法

中图分类号: TN82 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Accurate antenna measurement method based on micro UAV

Ma Songhui, Lu Yongchao, Liu Kejia, Guo Shuxia, Hu Chufeng

(Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Antenna measurement is very important for the performance verification of antenna radiation. However, when the antenna size is relatively large or the test frequency is relatively low, the traditional measurement method cannot meet the test requirement. In this paper, one kind of antenna measurement method based on the micro UAV is investigated for testing the large antenna in the outdoor environment. The gain pattern of measured antenna is obtained according to the measurement channel model. In this method, the real-time differential GPS is used as the navigation signal, and the geometric control method is combined to control the exact flight trajectory of UAV more accurately. Compared with the traditional navigation method based on GPS, the flight trajectory deviation of UAV is less than 0.1 meter. Experimental results show that the method can measure the antenna pattern precisely. The gain measurement error is less than 1 dB, which has high engineering application value.

Keywords: large antenna measurement; micro unmanned aerial vehicle; real-time differential GPS; geometric control method

0 引言

大型天线广泛应用于短波通信、雷达、射电天文、卫星广播电视等领域, 在实际的使用过程中, 为了保证系统正常工作, 需要对大型天线的电性能进行测试。然而大型天线的尺寸一般都非常大, 传统天线测量方法在评估天线电性能时具有较大困难。近些年, 随着计算机技术和电子技术的发展, 小型无人机的各项性能有了很大提高, 能够应用到大型天线测试领域。采用无人机进行大型天线测试具有以下优点: 1) 可以根

据天线尺寸和测试频率设定不同的测试距离; 2) 可以根据需要规划测量航线, 具有较高的定位精度; 3) 成本低, 使用灵活方便。

人们早期曾利用系留气球进行过相关课题的研究, 由于当时测试设备、定位技术和计算机技术的限制, 所需的辅助条件多, 操作困难, 测试费用高, 测量精度低^[1]。近几年来, 国内外尝试利用小型无人机对大型天线进行测量, 取得了一定的成果。意大利的研究人员以射电望远镜阵列项目为依托, 开展了大量研究^[2-6]。其主要利用小型无人机和信号源及天线作为空中信号源, 进行了 VHF/UHF 频段天线测量方法的验证, 借助全站仪及动态

收稿日期: 2019-02-22 Received Date: 2019-02-22

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(61871323、61571368)项目资助

后处理技术对无人机进行定位,通过修正测量路径损耗,使测量误差达到 1 dB。接下来,其对测试系统进行了电磁建模,分析了未校准电缆对天线阵方向图副瓣的影响^[7],并利用载波相位差分 GPS 提高无人机高度精度的估计^[8]。德国的研究人员基于小型无人机开展了大型天线的近场测量技术研究^[9-10],其不同之处在于采用激光进行定位,主要用于现场定期检查天线工作状态。西班牙的研究人员利用无人机开展了不同扫描方式下的近场测量,通过迭代傅里叶变换获得天线的远场方向图^[11],并开展了圆极化天线阵列的测试和诊断分析^[12]。另外,美国、比利时、土耳其、哥伦比亚等其他国家的研究人员也进行了相关技术的研究^[13-16]。国内使用小型无人机测量大型天线的工作起步较晚,上海交通大学的研究人员将频谱仪搭载到无人机上,实时获取大型米波天线的辐射方向图^[17]。北京无线电计量测试研究所的研究人员定性地分析了无人机测量相控阵天线的各种测量误差来源^[18]。杭州电子科技大学的研究人员分析了利用无人机的位置精度对天线方向图的影响,引入了极化匹配因子来补偿误差^[19]。

这些研究中使用的无人机主要采用 GPS 信号进行导航控制,飞行轨迹精度取决于 GPS 信号的导航精度,因而需要采用其他方式进行高精度定位,然后对测量数据进行路径修正。本文构建了一种基于小型无人机的天线测量系统,将信号源搭载在无人机上作为发射源,被测天线接收发射信号,建立了测试信道模型。利用实时差分 GPS 信号作为导航控制信号,结合几何控制方法精确控制无人机的飞行轨迹,提高了无人机的飞行轨迹精度。实验结果表明,利用该系统可以测量天线的方向图和增益,测试误差小于 1 dB,验证了系统及测试方法的有效性。

1 系统构成

测试系统主要由无人机、信号发射端(含信号源、功放和发射天线)和信号接收端(含频谱仪和测试计算机)构成,如图 1 所示。

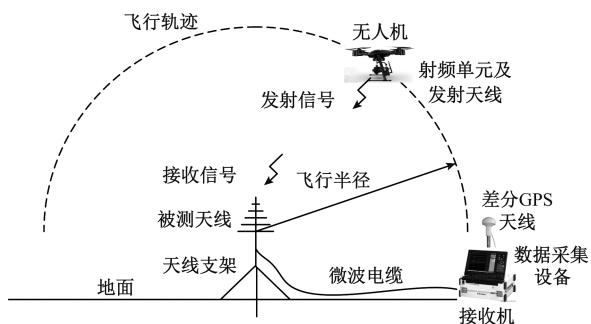


图1 系统构成图

Fig.1 Diagram of measurement system

信号发射端安装在无人机上,由无人机给信号源和功放供电,通过发射端天线发射信号。被测天线接收信号,通过微波电缆到接收机,数据采集设备获取接收机的数据。两个 GPS 天线分别放置在无人机和地面上,接收 GPS 信号形成差分 GPS 系统,提高无人机导航精度。

1.1 无人机

无人机的种类有很多,但对于以无人机作为平台的测试系统,采用多旋翼无人机较为合适。主要从 3 个方面考虑:1) 具有良好的抗风能力,能够在空中保持平稳的姿态;2) 飞行速度较慢,有利于数据的测量;3) 易于控制,定位准确。对于无人机的飞行半径,通常需要考虑被测天线的尺寸和测试频率,使无人机的飞行半径满足被测天线的远场条件。无人机通过地面站进行控制,设定飞行的起始位置、飞行速度等轨迹参数。

1.2 信号发射端

考虑将信号发射端放置在无人机上,主要原因在于若将被测目标作为发射源,则无人机很容易受到信号干扰,难以正常工作。而为了减小信号发射端的重量,通常采用一些小的射频模块,发射点频连续波信号。若发射信号的功率较小,可以增加小的功放单元。射频模块和功放可以由无人机上的电源供电,持续不断的发射信号。由于无人机在空中飞行时的姿态有可能受到影响,因而通常采用全向天线作为发射天线,这样保证了在较大的范围内发射信号的强度基本一致。若发射信号的频率与无人机数据链的频率接近,还需要考虑对数据链天线和发射天线进行隔离处理。

1.3 信号接收端

被测天线通常放置在地面上,且与地面间隔一定的距离,减小地面的干扰。被测天线与频谱仪相连,利用频谱仪采集被测天线接收到的信号。此时,频谱仪通常根据测试的频率点,设定一个较小的带宽,找到接收信号频率点的峰值,然后在飞行的过程中,不断采集该频率点的信号强度。

1.4 测试信道模型

根据无人机飞行轨迹,考虑测试过程中的收发信号传播过程,构建包含全部参数的信号功率链路模型,如图 2 所示。从图 2 的测试信道模型分析,各参量之间有如下关系:

$$P_r = P_t - L_2 + G_a - L_3 + G_t - L_d + G_r - L_1 \quad (1)$$

式中: P_r 为频谱仪接收功率; P_t 为信号源输出功率; L_d 为空间损耗; L_1 、 L_2 及 L_3 为电缆损耗; G_a 为放大器增益; G_t 为发射天线增益; G_r 为接收天线增益。

在忽略环境散射条件下,路径衰减计算公式为:

$$L_d = 20\lg(4\pi d/\lambda) = 20\lg(4\pi f/c) \quad (2)$$

式中: $\lambda = c/f$; c 为真空中的光速; f 为工作频率。

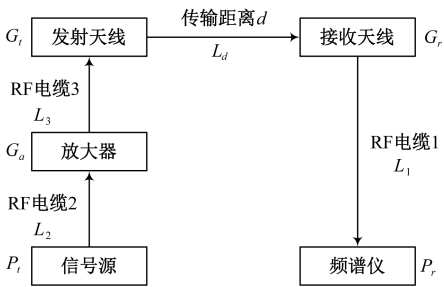


图2 测试信道模型

Fig.2 Model of measurement channel

在测试系统中,信号源、放大器和发射天线安装在无人机上,共同构成发射端,无人机会对发射天线方向图产生影响,需要对考虑无人机影响下得天线辐射性能进行测试,获得发射天线方向增益。

2 实时差分 GPS 高精度定位技术

实时差分技术(real-time kinematic, RTK),即载波相位差分技术,其工作原理是基站端将自身的载波观测量和坐标信编码成规定协议格式并通过通信链路发送到机载端,机载端实时接收来自基站端的观测量,同时结合自身接收到的卫星载波相位信息,实时处理相位差分观测量,从而实现厘米级高精度导航。

本文使用 ublox M8P 模块对导航精度进行验证,如图3所示。当采用传统的 GPS 信号进行导航时,其位置最大误差大约为 1 m,若采用此信号作为导航信号,飞行轨迹将产生约 1 m 的偏差。为了提高导航精度,采用实时差分 GPS 信号进行导航,收敛时间约 5 min,标称精度 0.025 m,更新频率 5 Hz。从差分 GPS 测试结果可以看到,当系统进入 fix 实时差分模式后,位置结果大部分在±2 cm 的范围内漂移。高度精度要比位置精度差,大部分在±5 cm 范围内漂移。

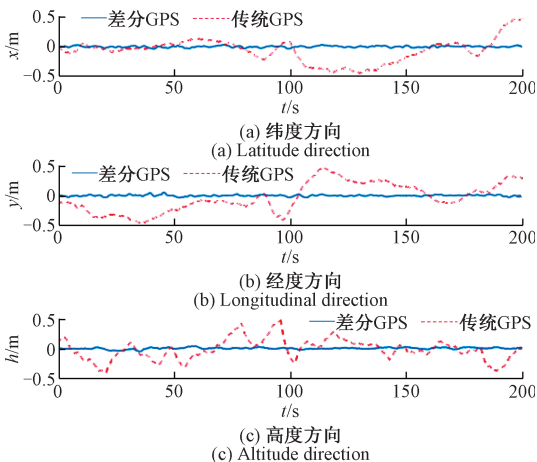


图3 传统 GPS 与差分 GPS 测试结果比较

Fig.3 Test results of GPS and real-time differential GPS

3 轨迹跟踪控制方法

对差分 GPS 测量结果与惯性测量结果进行组合导航估算,得到连续精确的位置、速度、姿态和角速率、加速度信号,飞行控制系统使用这些信号进行飞机的姿态和位置控制。无人机飞行轨迹的控制精度受到差分 GPS 定位精度的影响,最终关系到被测天线方向图的测试误差,例如当测试距离为 4 m、测试频率为 1 GHz 时,实际的飞行轨迹与理想轨迹的偏差(包含差分 GPS 定位误差和轨迹跟踪控制方法误差)为 0.1 m,根据式(2),被测天线方向图的测试误差约为 0.2 dB。

无人机的飞行轨迹可根据实际天线测试方向图的需求进行设定,例如对于全向天线,为了测得全方位的方向图,采用圆周飞行的方式。对于定向天线,则可根据辐射方向进行飞行。不管飞行何种轨迹,采用相同的轨迹跟踪控制方法。以垂直半圆轨迹为例说明天线测量过程中对位置的精确跟踪控制方法,如图4所示。首先定义本地坐标系,其坐标原点位于地面坐标系原点正上方 H_0 处。本地坐标系 z 轴垂直向下, x 轴方位角为 ψ 。定义半圆参考轨迹以本地坐标系原点为圆心,以点 S 为起点,以点 E 为终点,半径为 r ,半圆平面在本地坐标系 oyz 平面内。 P 为半圆上一点,定义旋转角 θ 为 OP 与 OS 的夹角,要求无人机沿半圆参考轨迹以角速度 $\dot{\theta}$ 飞行。根据半圆轨迹的参数化描述可以得到在半圆轨迹上每一点的参考位置、参考速度和参考加速度:

$$\begin{aligned} y_{\text{ref}} &= R \cos \theta, H_{\text{ref}} = R \sin \theta \\ V_{\text{ref}} &= -R \dot{\theta} \sin \theta, \dot{H}_{\text{ref}} = R \dot{\theta} \cos \theta \\ a_{\text{ref}} &= -R \dot{\theta}^2 \cos \theta, \ddot{H}_{\text{ref}} = -R \dot{\theta}^2 \sin \theta \end{aligned} \quad (3)$$

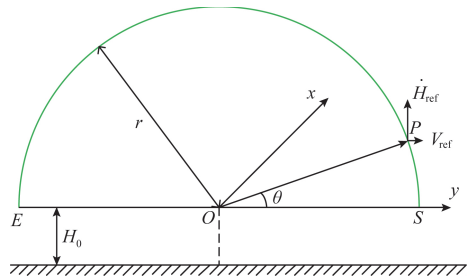


图4 垂直半圆测试轨迹

Fig.4 Test trajectory of differential GPS

上述参考指令定义在本地坐标系下,还需要坐标变换转换为地面坐标系下的参考位置、参考速度和参考加速度,这些参考指令是轨迹跟踪控制器的输入信号。轨迹控制器以姿态控制为内回路,采用 SE(3) 群上的几何控制方法^[20]计算期望旋转矩阵指令和期望力指令控制器结构如图5所示。

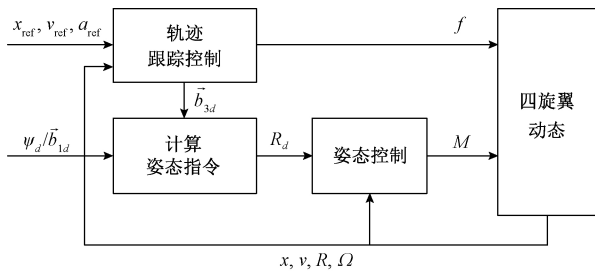


图5 控制器结构

Fig.5 Diagram of the controller

四旋翼无人机有4个独立控制量,因此能控制的自由度也是4个,选取三维位置和航向作为四个独立的被控制量,这些量是天线测量过程中所需要的飞行平台控制量。控制器的输入为期望的轨迹和航向,期望轨迹使用轨迹上的参考位置 x_{ref} 、参考速度 v_{ref} 和参考加速度 a_{ref} 来描述,参考航向为 ψ_d 。轨迹控制器输出为三轴加速度指令,由此确定了所需要拉力矢量方向和大小,即四旋翼 z 轴方向和拉力 f 大小,由此确定了机体轴 z 轴期望指令 $\vec{b}_{3d}$,该矢量为单位矢量。由 ψ_d 可以确定期望的机体坐标系 x 轴 $\vec{b}_{1d}$,从而可以得到期望的旋转矩阵 R_d ,该 R_d 为姿态控制器的输入。

在 $SO(3)$ 群上四旋翼动力学模型可以描述为:

$$\begin{aligned} \dot{R} &= R\Omega \\ J\dot{\Omega} &= M - \Omega \times J\Omega \end{aligned} \quad (4)$$

式中: R 为旋转矩阵; Ω 为三轴角速率; M 为控制力矩; J 为转动惯量矩阵。依据该动力学方程,基本控制律可写为:

$$M = \Omega \times J\Omega - K_R (\log R_e)^{\vee} - K_{\Omega} \Omega \quad (5)$$

该控制律以角速率控制为内回路,角速率控制以角加速度控制为内回路,角速率控制为比例控制,角加速度控制为比例积分控制。其中, R_e 表示群误差,它的表示从当前机体坐标系到期望机体坐标系的相对旋转矩阵,表征了使 R 趋于 R_d 所需要的旋转量。 R_e 是一个 3×3 矩阵,无法直接使用,需要将其映射为定义在机体坐标系中的旋转向量。 $(\log R_e)^{\vee}$ 即为该旋转向量,它的含义是旋转矩阵群 $SO(3)$ 到对应李代数 $so(3)$ 上的旋转向量的映射,表示流形局部一点到 R^3 向量空间的映射。该旋转向量可分解到每个机体轴上,定义了每个轴上所需旋转量的大小,从而可以通过一个比例环节计算出角速率指令 Ω_d 。

4 实验结果

对该系统及测试方法进行了验证,如图6所示,采用四旋翼无人机,测量一个对数周期天线,测试频率为

1 GHz,无人机围绕天线飞行垂直半圆轨迹,无人机作为发射端发射信号,对数周期天线作为接收端接收信号,由数据采集软件记录频谱仪的测量数据,同时无人机地面站记录无人机的飞行轨迹。测试时风速约为3级,无人机的飞行半径为4 m,满足天线测试的远场条件。测试极化为水平极化。对数周期天线离地面高度为1.5 m。无人机飞行速度为5 m/s,从起点到终点的飞行时间为36 s。每隔0.2 s采集一次频谱仪的数据,在36 s内共采集181个数据,对应被测天线方向图的采样间隔为 1° 。



图6 无人机测试天线照片

Fig.6 Antenna measurement based on UAV

信号源产生连续波信号,为了增加信号强度,在信号源后端连接功率放大器,功率放大器与发射天线相连,发射天线为偶极子天线,三者均安装在无人机上,如图7所示。由于信号源、功率放大器、3根电缆损耗在式(1)中均为固定值,将其进行连接后采用频谱仪对其进行测量,得到的结果约为14.7 dBm。

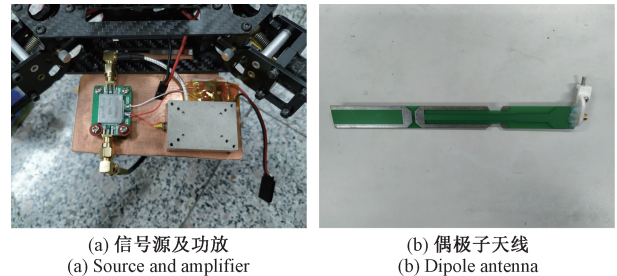


图7 信号发射端

Fig.7 Signal transmission on UAV

为了实现实时差分GPS导航定位,在地面和无人机上均装有GPS天线,实时解算无人机位置信息,实现高精度导航定位,如图8所示。

将实际多次飞行轨迹与理想半圆轨迹进行对比,如图9所示。

从图9可以看出,多次飞行的轨迹与理想轨迹基本重合,表明飞行具有良好的重复性。3条曲线中的最大

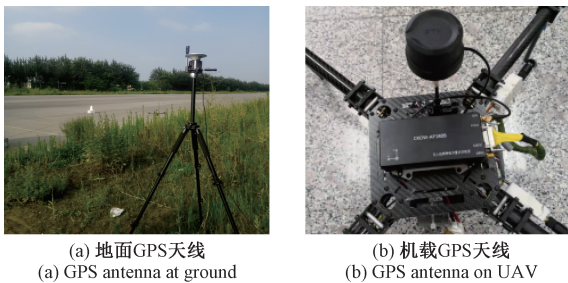


图 8 实时差分 GPS

Fig.8 Real-time differential GPS

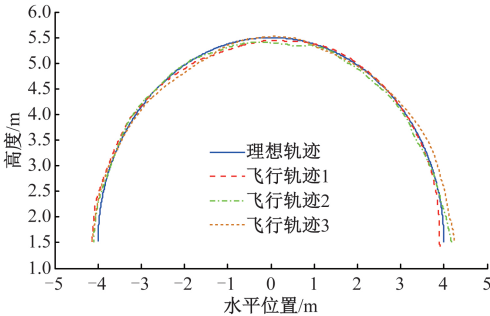


图 9 无人机多次飞行轨迹比较

Fig.9 Multi-flight trajectory of UAV

轨迹偏差为 0.25 m,不同水平位置下的平均轨迹偏差小于 0.1 m,说明了飞行轨迹的误差基本取决于实时差分 GPS 的位置精度,采用几何控制方法能够较为精确地控制无人机的飞行轨迹。因此,由实际飞行轨迹引入的路径损耗大约为 0.2 dB。根据式(2),半径为 4 m,频率为 1 GHz 时,空间路径的损耗为 44.483 dB。

根据式(1),对发射天线的增益方向图进行修正。将发射天线安装在无人机上,考虑无人机对天线方向图的影响,在微波暗室内测量得到的发射天线增益方向图如图 10 所示,由于受到无人机的影响,发射天线的增益方向图在 40°~140°具有轻微的起伏,两端电平下降较多,符合偶极子天线的方向图特点。

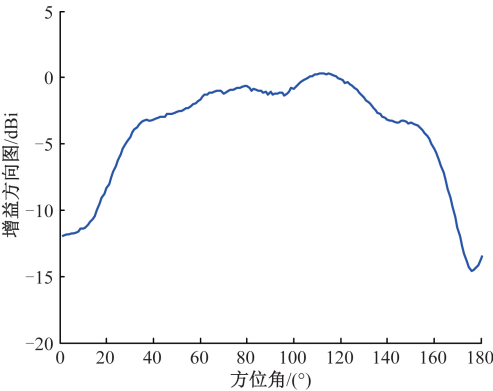


图 10 发射天线增益方向图(水平极化)

Fig.10 Gain pattern of transmission antenna
(horizontal polarization)

利用式(1)对频谱仪接收的数据进行处理,得到多次被测天线的增益方向图如图 11 所示,从图 11 可以看出,无人机测量天线方向图的大部分区域与远场测试值吻合良好,增益的最大误差小于 1 dB。

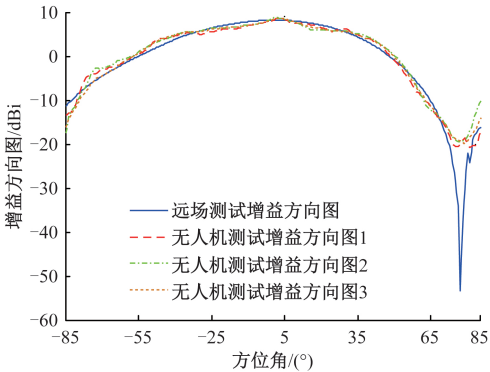


图 11 被测天线增益方向图比较

Fig.11 Comparison of gain patterns

5 结 论

针对大型天线的外场测试问题,本文研究了一种基于小型无人机的天线测试方法。将信号源和功率放大器装载在无人机上作为信号发射端,被测天线放在地面上方接收发射信号,由频谱仪采集测试数据,通过测试信道模型计算被测天线的增益方向图。为了获取高精度测试数据,利用实时差分 GPS 信号作为无人机的导航定位信号,采用几何控制方法对无人机的飞行轨迹进行精确控制。实验结果表明飞行轨迹的偏差小于 0.1 m,被测天线的增益方向图与远场值基本一致,验证了测试方法的可行性和准确性。

小型无人机具有操作灵活、成本低等优点,可以根据实际的测试需求规划飞行轨迹,并且不受测试距离的限制。这种测试方法具有较为广阔的应用前景,能够应用于射电天文望远镜、舰载天线、电视广播天线、低频阵列天线等大型天线的测试中。

参考文献

[1] STEELE J. Measurement of antenna radiation patterns using a tethered balloon [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1965, 13(1):179-180.

[2] VIRONE G, M. LINGUA A, PIRAS M, et al. Antenna pattern verification system based on a micro unmanned aerial vehicle (UAV) [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014(13):169-172.

- [3] PAONESSA F, VIRONE G, AICARDI I, et al. Recent results in antenna pattern measurement with UAVs[C]. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2015: 720-721.
- [4] VIRONE G, PAONESSA F, CAPELLO E, et al. UAV-based antenna and field measurements [C]. IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications, 2016:1-3.
- [5] PAONESSA F, VIRONE G, BOLLI P, et al. UAV-based antenna measurements: Scan strategies [C]. European Conference on Antennas and Propagation, 2017: 1303-1305.
- [6] PAONESSA F, VIRONE G, BOLLI P, et al. UAV-based antenna measurements improvement of the test source frequency behavior [C]. IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications, 2018:1-3.
- [7] ACEDO E D, BOLLI P, PAONESSA F, et al. SKA aperture array verification system: electromagnetic modeling and beam pattern measurements using a micro UAV[J]. Experimental Astronomy, 2018, 45(1): 1-20.
- [8] VETRELLA A R, CAUSA F, RENGA A, et al. Multi-UAV Carrier phase differential GPS and vision-based sensing for high accuracy attitude estimation[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 93(1-2): 245-260.
- [9] FRITZEL T, STRAUß R, STEINER H J, et al. Introduction into an UAV-based near-field system for in-situ and large-scale antenna measurements [C]. IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications, 2016:1-3.
- [10] FRITZEL T, STEINER H, STRAUS R. Laser tracker metrology for UAV-based antenna measurements [C]. IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications, 2018:1-3.
- [11] GARCIA-FERNANDEZ M, ALVAREZLOPEZ Y, ARBOLEYA A, et al. Antenna diagnostics and characterization using unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Access, 2017(5): 23563-23575.
- [12] GARCIA-FERNANDEZ M, ALVAREZ-LOPEZ Y, LASHERAS F. UAV-based antenna measurement and diagnostics for circularly polarized antenna arrays [C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, 2018: 525-526.
- [13] SALAZAR J L, UMEYAMA A, FULTON S C. UAS-based antenna pattern measurements and radar characterization [C]. IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications, 2018:1-3.
- [14] MARTÍNEZPICAR A, MARQUÉ C, ANCIAUX M, et al. Antenna pattern calibration of radio telescopes using an UAV-based device [C]. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2015: 981-984.
- [15] STÜNER F, AYDEMIR E, GÜLEÇ E, et al. Antenna radiation pattern measurement using an unmanned aerial vehicle (UAV) [C]. General Assembly and Scientific Symposium, 2014:1-4.
- [16] CADAVID A N, ARISTIZABAL J, ALHUCEMA M D P. Antenna pattern verification for digital TV broadcast systems in Andean countries based on UAV's [C]. IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, 2018: 858-861.
- [17] 姚磊, 袁斌, 王超, 等. 一种新颖的基于无人机系统的米波天线E面方向图测量方法 [C]. 全国微波毫米波会议, 2017: 2222-2226.
- YAO L, YUAN B, WANG CH, et al. A novel method to measure the E-plane radiation pattern of meterwave antenna based on unmanned aerial vehicle system [C]. Microwave and Millimeter wave Conference, 2017: 2222-2226.
- [18] 索炜, 宋旸. 天线阵方向图无人机测试系统研究 [J]. 宇航计测技术, 2018, 38(1): 42-47.
- SUO W, SONG Y. Research on the UAV measurement system of phased array antenna pattern [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2018, 38(1): 42-47.
- [19] ZHANG J Y, SHUANG Q L, CHEN Z P, et al. Research on the measurement of antennas radiation characteristics based on small unmanned aerial vehicle platform [J]. Procedia Computer Science, 2018, 131: 462-468.
- [20] LEE T, LEOK M, MCCLAMROCH N H. Geometric tracking control of aquadrotor UAV on SE(3) [C]. IEEE

Conference on Decision and Control, 2010; 5420-5425.

作者简介



马松辉, 分别在 1999 年、2002 年和 2007 年于西北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为西北工业大学无人机特种技术重点实验室副教授, 主要研究方向为无人机飞行控制与仿真。

E-mail: masonghui@nwpu.edu.cn

Ma Songhui received his B. Sc. , M. Sc. and Ph. D. degrees all from Northwestern Polytechnical University in 1999, 2002 and 2007, respectively. He is currently an associate professor in Science and Technology on UAV Laboratory at Northwestern Polytechnical University. His main research interests include flight control and simulation of UAV.



胡楚锋(通信作者), 分别在 2004 年、2007 年和 2010 年于西北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为西北工业大学无人机特种技术重点实验室副教授, 主要研究方向为天线测量及雷达成像、微波遥感。

E-mail: huchufeng@nwpu.edu.cn

Hu Chufeng (Corresponding author) received his B. Sc. , M. Sc. and Ph. D. degrees all from Northwestern Polytechnical University in 2004, 2007 and 2010, respectively. He is currently an associate professor in Science and Technology on UAV Laboratory at Northwestern Polytechnical University. His main research interests include antenna measurement and radar imaging and microwave remote sensing.