

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306564

超大型地面天线辐射特性实地测量技术

刘灵鸽 张启涛 万继响

(西安空间无线电技术研究所 西安 710100)

摘要:针对口径超过10 m的超大型地面天线由于极高成本难以进行精确测量的难题,提出了基于无人机的平面近场实地测量方法。首先对无人机散射、定位精度及测量场区选择等影响天线实地测量结果的主要因素进行了仿真分析,确定了测量区域。采用多旋翼无人机和高精度飞控技术,在高性能无人机最好20 mm飞控精度、5 mm测量精度的条件下,进行了天线实地测量系统的射频链路设计,并给出了两种近远场数据变换方法,可以有效解决在较高频段无人机定位精度差导致测量结果不可信的问题。采用实例分析验证了方法的有效性,为超大型地面天线低成本精确测量提供了较好的解决途径。

关键词:超大型天线;平面近场;无人机;实地测量

中图分类号: TN822 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Onsite measurement technology for radiation characteristics of ultra large ground antennas

Liu Lingge Zhang Qitao Wan Jixiang

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: A planar near field measurement method based on unmanned aerial vehicles (UAVs) is proposed to address the difficulty of precise measurement of ultra large ground antennas with apertures exceeding 10 meters due to their extremely high cost. Firstly, simulation analysis was conducted on the main factors that affect the antenna field measurement results, such as drone scattering, positioning accuracy, and measurement field selection. The measurement area was determined to use multi rotation drones and high-precision flight control technology. Under the condition of high-performance drones with the best 20 mm flight control accuracy and 5 mm measurement accuracy, the RF link design of the antenna field measurement system was carried out, and two near to far field data transformation methods were provided, they can effectively solve the problem of unreliable measurement results caused by poor positioning accuracy of drones in higher frequency bands. The effectiveness of the method was verified through case analysis, providing a good solution for low-cost and accurate measurement of ultra large ground antennas.

Keywords: ultra large ground antennas; planar near-field; UAV; testing technology

0 引言

传统的天线测量通常分为室内和室外两种,对于较大口径的天线,室内一般采用近场和紧缩场的测量技术,无论哪一种室内的测量技术,要测量超大口径的天线,测量系统和暗室的建设成本都过于昂贵,因此现有的室内测量系统很难覆盖超大型天线的测量需求。

一般来讲,有效口径超过15 m的天线可认为是超大口径天线。目前,我国已经建成的地面测控站中,最大天

线口径已超过60 m。针对超大口径的地面天线,常采用卫星法和信标塔法进行远场测量。卫星法是利用卫星配置的信标天线作为辅助天线进行测量,缺点是测量精度差且可测量的频点极其受限,仅有工作在S、X和Ka频段的个别频点可采用此方法测试;信标塔法是在满足远场条件的一定距离处建设信标塔,把辅助天线安装在信标塔上,信标塔一旦建成,测试距离固定,需要更远距离的超大口径天线则无法利用该信标塔。受地形等环境的影响,越来越难找到距离达数公里甚至数百公里远的电磁环境较为纯净的区域,因此,信标塔法的使用也很

受限。

近年来,出现了基于无人机的天线测量技术。2014 年,意大利的科学家设计了一种新型的基于无人机的天线辐射特性远场测量装置^[1],在无人机上安装持续工作的发射机,作为远场测试发射源,被测天线置于地面,开展天线远场测量,该类型的装置在 2015 年用于射电天线的辐射特性测量^[2]。2016 年,德国科学家开展了基于无人机的天线辐射特性近场测量技术的开创性研究工作^[3],近场探头安装在无人机平台上,进行了天线的近场测量验证。国内也开展了相关技术的研究工作,2017 年,上海交通大学的研究人员设计了用于米波类型天线辐射特性的无人机远场测量系统^[4],2018 年,北京无线电计量测试研究所的技术人员使用无人机已经可以实现基本的米波天线阵辐射特性的远场测量、调试^[5]。

对于较小口径的天线,远场条件容易满足,而对于工作频率较高的超大口径天线,由于远场距离高达几百公里,无人机的飞行高度在很多城市和地区会被限制,这种情况更适合采用近场的测量方法。很自然地,把目光转向基于无人机的室外平面近场。与传统的固定室内近场测量系统相比,无人机的定位精度稍差,另外,收发天线间线缆的无缠绕连接较为困难。针对这些困难,本文给出了基于无人机平面近场的低成本超大口径天线实地测量方法,解决地面站、地面大型测控天线等超大口径天线低成本测量的问题。

1 关键因素分析

本章对影响基于无人机的大型平面近场测量结果的关键因素进行分析,为后续方案设计提供支撑。

1.1 无人机散射对测量结果的影响分析

近场测量探头一般为宽波束天线,安装在无人机机身上,机身对探头的方向图会产生较大的影响,如图 1 所示,方向图抖动幅度 ± 1 dB。分别用理想的探头方向图数据和受干扰的探头方向图数据对 40 dBi 增益的天线近场测量数据做处理,进行探头补偿^[6-8],处理后的远场结果如图 2 所示。从图 2 的仿真结果看,探头方向图受无人机的干扰,对被测天线的主极化方向图几乎没有影响,对交叉极化方向图的影响也很小,这是因为,与被测超大口径天线的增益相比,探头的增益很小,所贡献的能量变化对结果的影响可以忽略,因此在关注的方向图轴向附近,不会造成严重干扰。

在本节的分析中,假定被测天线的增益 ≥ 40 dBi,由这个条件可以确定被测天线的口径范围,以反射面天线为例,当口径效率为 0.7 时,不同波段的最小口径如表 1 所示,这也是本文描述测量方法的适用范围。从表 1 可以看出,方法对被测天线的最大口径没有限制,且口径越

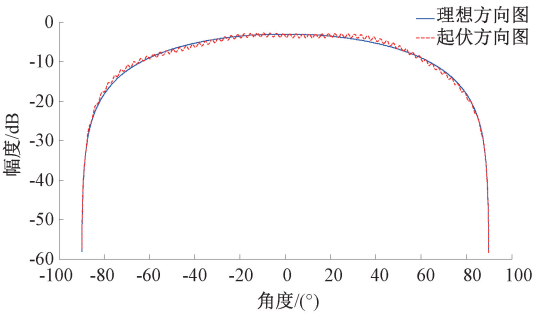
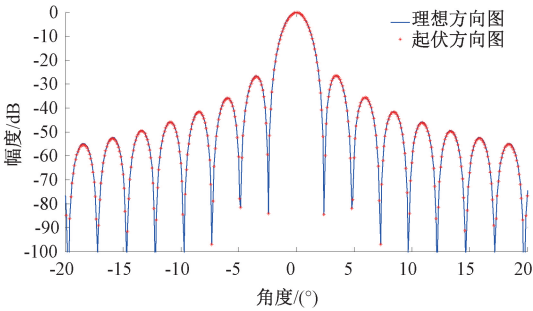
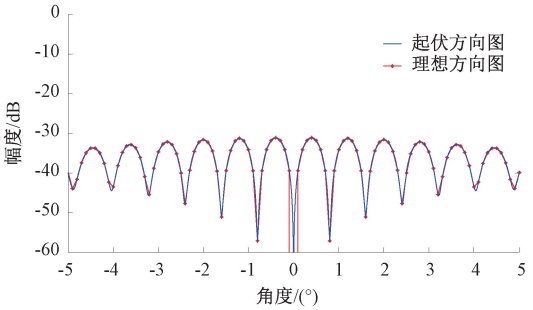


图 1 理想探头方向图和受干扰方向图
Fig. 1 Ideal pattern and disturbed pattern



(a) 主极化方向图对比
(a) Comparison of main polarization patterns



(b) 交叉极化方向图对比
(b) Comparison of cross polarization patterns

图 2 无人机散射对天线方向图的影响

Fig. 2 The influence of UAV scattering on antenna pattern

大,测试效果越好。

表 1 被测天线的口径范围

Table 1 The size range of antenna under test		
序号	频段	可测试天线最小口径/m
1	L	9.50
2	S	5.00
3	C	1.90
4	X	1.50
5	Ku	1.00
6	Ka	0.60

1.2 平面近场测量对无人机定位精度的要求

无人机飞行位置与姿态精度的要求是系统的核心指

标。在不同工作频段,对无人机位置精度要求不同,一般要求的位置定位精度为工作波长的 1/50,如表 2 所示。

表 2 近场测量对无人机定位精度的要求

Table 2 Requirements for UAV positioning accuracy in near-field measurement		
频段	位置定位精度/mm	角度定位精度
L	5.00	
S	2.60	
C	1.00	定向角(极化角):0.10°
X	0.80	翻滚角、俯仰角:3.10°
Ku	0.50	
Ka	0.30	

无人机的定向精度对应测量探头极化方向,其他两个角度对应探头指向,因此,定向角的精度要求最为苛刻,参考传统平面近场的要求,该角度精度要求定位 0.1°,对于另外两个角度(翻滚角和俯仰角),查看图 3 的典型探头方向图,可以看出,翻滚角和俯仰角变化 5°时,对应的幅度误差约为 0.1 dB,在可接受的范围内。然而,这两个角度尽管对探头幅度方向图不敏感,但过大的角度误差会带来位置误差,这里定义为 3°。以探头相位中心偏离无人机旋转轴 200 mm 为例,3°的角度误差对应的横向位置误差为 10.5 mm,纵向位置误差为 0.3 mm,通过实时位置测量装置可以较为精确的测量采样点的位置信息。

1.3 平面近场测量场区的确定

目前,无人机的最好定位精度为 20 mm,不满足表 1 对位置定位精度的要求。为解决这一难题,在飞控过程中对数据采样位置进行实时监测,距离 200 m 时位置测量精度为 5 mm,结合特殊的非均匀间隔近远场变换技术,可以仅考虑 5 mm 的位置误差即可,但仍不能满足 S 波段以上天线的精确测试需求。

由于无人机的位置精度差以及其他飞控的特性,希望数据采样区域的天线场分布较为平滑,使得位置误差对采样数据的影响尽可能小。天线口面向上,无人机在距离天线口面一定距离的平面上做飞行和数据采集,如果数据采集平面距离天线口面(地面)太近,无人机飞行中的地面效益会很明显,增加精确飞控的难度,另外,天线采集面上的场分布也会剧烈抖动,采样位置的微小偏差会导致幅度相位值巨大的变化,不利于精确测量,因此选择较远的测量距离比如中场距离,此时,无人机距离地面较远,可以忽略地面效益,同时场的分布会比较平滑,幅度相位值对采样位置误差不那么敏感,即在天线的中场距离上进行测量^[9]。文献对中场测量技术的有效性进行了验证,在关注区域,测量结果的一致性很好。

与天线近场区相比,天线中场区的场分布相对平滑,幅度相位随位置偏差的影响相对较小。以某 4.2 m 口径

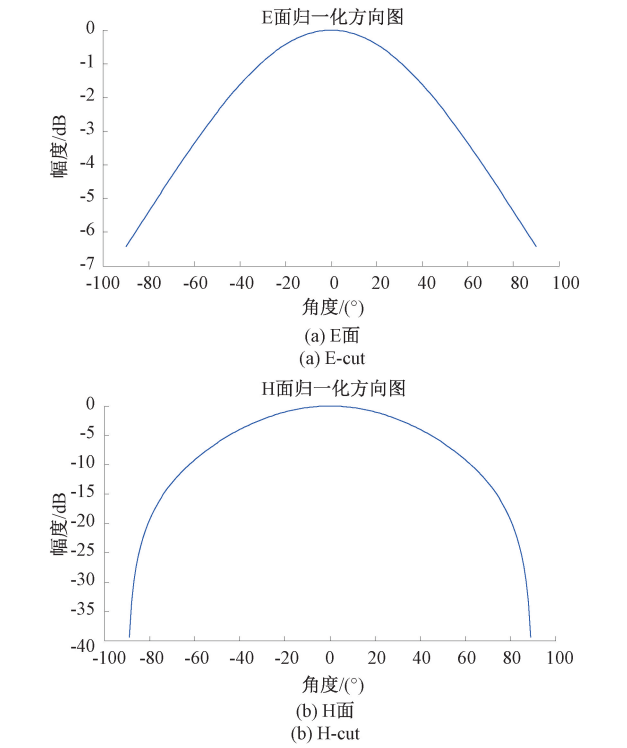


图 3 典型探头的方向图
Fig. 3 Pattern of typical probes

反射器天线不同距离主能量区域的场分布为例,纵向和横向各 5 mm 的位置偏差对幅度相位值的最大影响如表 3 所示。

表 3 位置偏差与幅相偏差的对应关系

Table 3 Correspondence between position deviation and amplitude phase deviation				
波段	距离/ m	位置偏差/ mm	幅度偏差/ (p-p 值,dB)	相位偏差/ (p-p 值,(°))
Ka	100	纵向	0.22	64.30
		横向	0.20	4.10
	200	纵向	0.18	62.10
		横向	0.15	3.20
S	60	纵向	0.05	11.90
		横向	0.08	0.40
	200	纵向	0.03	12.20
		横向	0.04	0.20

从表 3 可以看出,在距离天线口径 200 m 处,频率较低的 S 波段,横向和纵向 5 mm 的位置误差对幅度的最大影响分别为 0.04 和 0.03 dB,可以忽略不计;在频率较高的 Ka 波段,横向和纵向 5 mm 的位置误差对中场幅度的最大影响为 0.15 和 0.18 dB,这个影响将会对天线最终的性能测量结果产生一定的偏差;于此同时,上述纵向位置偏差对相位的影响巨大。由表 3 可以得出以下结论,在幅相变化较平缓的天线中场区进行测量,配合位置实

时测量装置,天线幅度的测量结果基本可信,相位测量结果不可信,必须对纵向位移偏差导致的相位偏差进行修正,或者采用平面近场无相位测量技术。

2 系统设计

2.1 系统链路设计

设计测量系统链路考虑有相位参与和无相位参与两种近远场变换的工况。以被测天线发射为例,系统链路如图 4 所示,地面信号源通过定向耦合器给被测天线馈电,经两个不同高度的机载双线极化探头接收后通过光电转换技术传输至地面接收机,完成测量通道信号的传输,而定向耦合器的另一路直接进入接收机作为参考通道。采用光电转换技术的优势是大幅减少传输损耗,提升系统动态范围。系统动态范围预算结果如表 4 所示,可以看出,最差的动态范围在 Ka 波段为 56 dB,满足测量需求。另外,为避免光线与被测件的缠绕,在被测天线的最顶端放置光纤收拢器,局部放大图如图 5 所示。

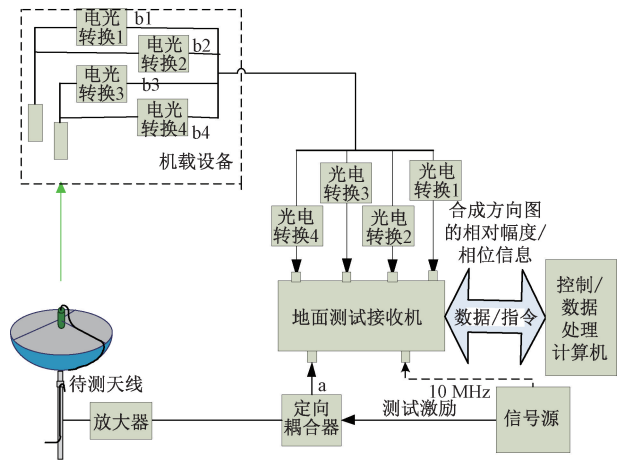


图 4 测量链路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement link

表 4 动态范围预算结果

Table 4 Dynamic range budget results

频段	X		Ka
信号源输出功率/dBm	13.00	13.00	15.00
耦合器输出功率/dBm	10.00	10.00	10.00
放大器输出功率/dBm	40.00	40.00	40.00
被测天线增益/dBi	-62.00	-73.00	-75.00
机载探头增益/dBi	6.00	6.00	6.00
电光变换损耗/dB	-30.00	-30.00	-30.00
光电变换损耗/dB	-30.00	-30.00	-30.00
中频增益	30.00	30	30.00
接收机接收电平/dBm	-46.00	-57	-59.00
接收机低噪 (dBm, IFBW = 1 kHz)	-115.00	-115.00	-115.00
系统动态范围 (dB, IFBW = 1 kHz)	69.00	58.00	56.00

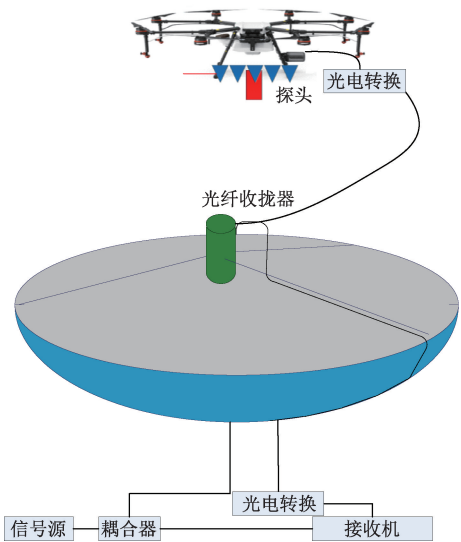


图 5 安装在被测天线上的光纤收拢器

Fig. 5 Fiber optic concentrator installed on the tested antenna

2.2 无人机子系统

对于天线测量,多旋翼无人机(图 6)相较于固定翼无人机和无人直升机具有很多优势,其飞行器结构简单,系统紧凑,可靠性高。

采用载波相位差分技术提高定位精度。差分定位设备包括基站端和机载端,基站端和机载端必须进行载波相位测量,其工作原理是基站端将自身的载波观测量和坐标编码成 RTCM 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,从而实现高精度厘米级定位,最高定位精度可以达到 20 mm 以内。



图 6 四旋翼无人机

Fig. 6 Quadrotor UAV

使用双天线定向技术获取方位信息,双天线定向是指在载体上安放两根天线,使用两根天线接收到的 GNSS 信号进行载体定向。双天线定向使用的思路是相对定位

中的基线向量求解方法,把同一颗卫星的信号传播到两根天线的路径视为两条互相平行的路径,通过求解卫星信号载波相位的双差方程得到基线向量。解算出的基线向量经过坐标转换,可以得到在本地东北天坐标系下的定向结果,在短基线条件下求解航向角信息。在 1 m 基线以下可以达到 0.1° 的定向精度。

2.3 射频子系统

射频子系统主要包括测量探头、多通道接收机、光电转换模块等。

测量探头安装在无人机平台上,探头的辐射特性会受到不良影响。如果探头天线增益高,则测量受无人机俯仰角和翻滚角变化的影响就大,如果天线增益低,则受无人机平台散射的影响大。由 1.1 节的分析可知,尽管低增益测量探头本身对无人机平台很敏感,其方向图会产生明显抖动,但对高增益(≥ 40 dBi)被测天线的影响可以忽略,因此,最终选用低增益测量探头。

多通道接收机实现测量探头射频输出信号的处理、存储及传输,典型的原理图如图 7 所示,射频信号经放大滤波后进行下变频处理(可以多级),得到最终所需的中频信号。中频信号先经过低通滤波器进行谐波和杂波抑制,在通过高增益放大器进行增益补偿,最终的带通滤波器实现对中频信号的带宽选择和杂波抑制。

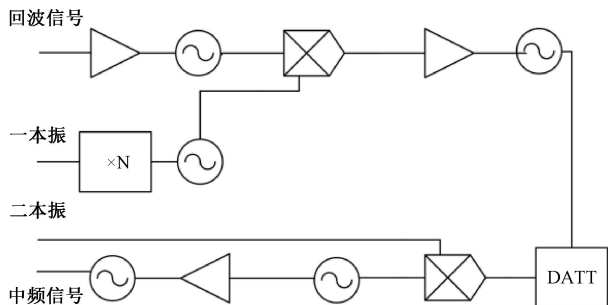


图 7 接收机原理图

Fig. 7 Receiver schematic diagram

光电转换模块如图 8 所示,单个模块重量 56 g,4 个模块的总重 224 g。工作温度范围 $-55^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$,湿度范围 10%~95%,满足测量环境条件的要求。工作直流电压 5 V,可由无人机平台供电。

2.4 近远场变换算法

如图 4 的测量链路,接收机接收到的 4 路测量信号 b1、b2、b3、b4 和一路参考信号 a,4 路测量信号分别对应被测天线在两个平面(d_1 和 d_2)的两组正交极化分量,分别记作 $\vec{E}_{d1x}$ 、 $\vec{E}_{d1y}$ 、 $\vec{E}_{d2x}$ 、 $\vec{E}_{d2y}$,采用两种数据处理方法进行近远场变换。

1) 有相位参与的近远场变换



图 8 光电转换模块

Fig. 8 Optoelectronic conversion module

采用 d_1 平面的一组正交极化分量 E_{d1x} 和 E_{d1y} 进行数据处理。由于位置定位精度不能满足测量需求,必须对直接测量所得的数据做修正,补偿位置偏差带来的影响。实际采样点的位置为未知信息,影响最大的是纵向位置偏差对相位数据的影响。采用标准天线定高技术获取采样点纵向位置真实信息,即安装性能已知的标准天线,通过对比标准天线在理想位置与实际采样点位置的相位差值,获得实际采样点位置的纵向(z 向)位置信息。获得的位置偏差记作 δ_z ,采样点的纵向位置坐标为 $z = d_1 + \delta_z$, d_1 为理想测量距离。由于天线产生的电磁场的平面波谱与天线的远场方向图有着一个直接的对应关系,某个方向的平面波谱与天线在该方向的远场相对应,对窄波束天线,如果它的最大辐射方向为 $\vec{k}_0$,则在它产生的电磁场的平面波谱中, $\vec{k}_0$ 方向的谱含量占绝对优势,作为零阶近似,在分析该天线的近场时,可以认为它是沿 $\vec{k}_0$ 方向传播的平面波。超大型地面天线的波束很窄,波束指向 $\vec{k}_0$ 与扫描面的夹角记作 θ ,实际采样点投影到 d_1

平面对应位置处的电场记为 $\vec{E}_{d1x}^0$ 、 $\vec{E}_{d1y}^0$,则:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{d1x}^0 &= \vec{E}_{d1x} e^{j\delta_z / \sin\theta} \\ \vec{E}_{d1y}^0 &= \vec{E}_{d1y} e^{j\delta_z / \sin\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

对直接采集的近场数据进行式(1)的修正,利用非均匀间隔的离散傅里叶变换技术^[10-13]进行近远场变换,获得天线的远场方向图,如果是圆极化天线,在远场进行圆极化合成。

2) 无相位参与的近远场变换

采用 d_1 和 d_2 两个平行平面的正交极化分量的幅度信息进行数据处理。 d_1 平面的一组正交极化分量的幅度记作 E_1E_2 , d_2 平面的一组正交极化分量的幅度记作 E_3E_4 , δ_0 为 d_1 平面两个正交分量的相位差。采用无相位

平面近场测量技术^[14-17]和非均匀间隔的离散傅里叶变换技术进行近远场变换,获得天线的远场方向图。同样,如果是圆极化天线,在远场进行圆极化合成。

2.5 实例验证

2.4 节描述的两两种数据处理方法,方法 1 的数据处理过程假定 5 mm 的横向位置偏差对电场幅度和相位的影响以及 5 mm 的纵向位置偏差对电场幅度的影响可以忽略。方法 2 的数据处理过程假定最大 5 mm 的纵向及横向位置偏差对电场幅度的影响可以忽略。很明显,方法 1 的假定条件更苛刻,但方法 2 在实际应用时可能不收敛,因此对方法 1 假定的成立情况进行实例验证,确保最坏工况下整体方案可行。

采用 2.3 节大口径天线 Ka 波段距离 200 m 的中场分布,参考表 3,在实际场分布的基础上,叠加位置偏差带来的幅相误差,构建最恶劣情况下最大幅度 0.33 dB、相位 3.2°的随机误差分布矩阵,分别对幅相误差叠加前后的场分布进行近远场变换,变换结果的远场方向图对比情况如图 9 所示,可以看出在关注区域的远场方向图主瓣、第 1 副瓣均有很好的重合性,差别主要体现在通常不太关注的远旁瓣区域,证明本文给出的测试方案可用于超大口径地面天线的实地测量。

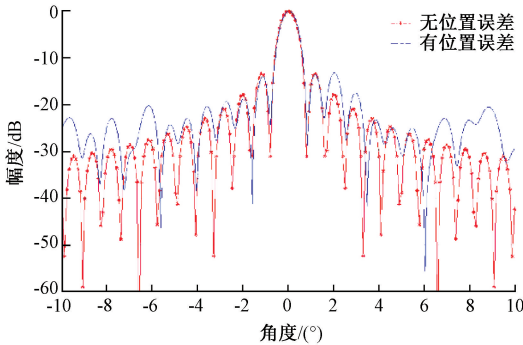


图 9 有无位置误差的方向图对比
Fig. 9 Comparison of patterns with and without positional errors

2.6 测量误差分析

本文给出的超大口径天线实地测量方法的理论基础是天线平面近场测量理论^[18-19],因此采用传统的平面近场测量 18 项误差源^[20],以 Ka 波段 4.2 m 口径天线为例,给出方向图旁瓣和天线增益误差分析结果,如表 5~6 所示。可以看出,-20 dB 旁瓣电平的误差±2.034 dB、增益的误差±0.48 dB,高于传统平面近场-20 dB 旁瓣电平±1.5 dB、增益±0.3 dB 的典型值,但满足一般天线测量的需求。

表 5 方向图副瓣 (-20 dB) 不确定度分析结果
Table 5 Uncertainty analysis results of pattern sidelobe (-20 dB)

序号	误差源	误差界/	标准不确定度 $u(x_i)$ /
		dB	dB
1	探头方向图	0.21	0.07
2	探头极化	0.62	0.21
3	探头安装对准	0.50	0.29
4	采样间隔	0.28	0.16
5	扫描截断	1.17	0.68
6	探头 X-Y 向位置误差	0.30	0.17
7	探头 Z 向位置误差	0.52	0.30
8	多次反射	0.01	0.01
9	接收机幅度非线性	0.05	0.03
10	系统相位误差	0.31	0.18
11	系统动态范围	0.03	0.01
12	环境散射	0.73	0.52
13	泄露和串扰	0.03	0.01
14	幅度和相位随机误差	0.11	0.04
合成标准不确定度 ($k=1$)			1.02 dB
扩展不确定度 ($k=2$)			2.03 dB

表 6 增益不确定度分析结果
Table 6 Uncertainty analysis result of gain

序号	误差源	误差界/	标准不确定度 $u(x_i)$ /
		dB	dB
1	探头安装对准	0.15	0.09
2	阻抗失配	0.01	0.01
3	采样间隔	0.03	0.02
4	扫描截断	0.11	0.06
5	探头 X-Y 向位置误差	0.18	0.10
6	探头 Z 向位置误差	0.19	0.11
7	多次反射	0.00	0.00
8	接收机幅度非线性	0.01	0.00
9	系统相位误差	0.03	0.02
10	系统动态范围	0.00	0.00
11	环境散射	0.17	0.12
12	泄露和串扰	0.00	0.00
13	幅度和相位随机误差	0.01	0.00
合成标准不确定度 ($k=1$)			0.22 dB
扩展不确定度 ($k=2$)			0.44 dB

3 结 论

本文在充分仿真验证的基础上,给出了超大型地面天线辐射特性的低成本实地测量方法,进行了测量系统设计和实例分析验证,为超大型天线的低成本辐射特性测量提供了较好的解决途径。

参考文献

[1] VIRONE G, PAONESSA F. UAV-based radiation pattern verification for a small low-frequency array [C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, USA, 2014: 995-996.
[2] PICAR A M, MARQUÉ C, ANCIAUX M, et al.

- Antenna pattern calibration of radio telescopes using an UAV-based device[C]. 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). IEEE, 2015: 981-984.
- [3] FRITZEL T, STRAUß R, STEINER H, 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.
- [4] 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 for measuring the E-plane pattern of a meter wave antenna based on UAV system [C]. National Microwave and Millimeter Wave Conference, 2017: 2222-2226.
- [5] 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 UAV-based antenna array pattern testing system [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2018, 38(1): 42-47.
- [6] FRANCESCO D A, FLAMINIO F, CLAUDIO G, et al. Probe compensated near-field to far-field transformation with helicoidal scanning for elongated antennas [C]. 19th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, 2007.
- [7] CHANG C C, CHEN S Y. Probe-compensated microwave holographic imaging [C]. 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). IEEE, 2014: 1099-1100.
- [8] 马红星,陈玉林. 平面近场测量中探头补偿方法的研究[J]. 火控雷达技术, 2015, 44(1): 71-74.
- MA H X, CHEN Y L. Research on probe compensation method in planar near-field measurement [J]. Fire-Control Radar Technology, 2015, 44(1): 71-74.
- [9] 赵兵,张启涛,刘灵鸽. 平面近场中场测试研究[J]. 空间电子技术, 2016, 13(6): 6-9.
- ZHAO B, ZHANG Q T, LIU L G. Research on midfield testing based planar near-field theory [J]. Space Electronics Technology, 2016, 13(6): 6-9.
- [10] ZHOU X, SUN H, HE J. NUFFT-Based iterative reconstruction algorithm for synthetic aperture imaging radiometers [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 273-276.
- [11] KEINER J, KUNIS S, POTTS D. Using NFFT 3-A software library for various nonequispaced fast fourier transforms [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2010, 6(4): 19. 1-19. 30.
- [12] 陈浩,吴仁彪,刘家学,等. 基于 NUFFT 的探地雷达偏移成像算法[J]. 信号处理, 2009, 25(8A): 615-619.
- CHEN H, WU R B, LIU J X, et al. GPR migration imaging algorithm based on NUFFT [J]. Signal Processing, 2009, 25(8A): 615-619.
- [13] 薛会,张丽,刘以农. 非标准快速傅立叶变换算法综述[J]. CT 理论与应用研究, 2010, 19(3): 33-46.
- XUE H, ZHANG L, LIU Y N. A survey of non-standard fast fourier transform algorithms [J]. CT Theoretical and Applied Research, 2010, 19(3): 33-46.
- [14] RUBAEK T, ZHURBENKO V. Microwave imaging using amplitude-only data [C]. Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. IEEE, 2010: 1-4.
- [15] ALVAREZ Y, GARCIA C, GEOMETRY F. Reconstruction from amplitude-only scattered field data [C]. 5th European Conference on Antennas and Propagation, 2011.
- [16] 刘灵鸽,赵兵,陈波. 太赫兹天线无相测试方法[J]. 空间电子技术, 2013, 10(4): 17-20.
- LIU L G, ZHAO B, CHEN B. Phase free testing method for terahertz antennas [J]. Space Electronics Technology, 2013, 10(4): 17-20.
- [17] 霍鹏,武建华,王正鹏,等. 天线平面近场无相位测量的数字全息重构 [C]. 中国电子学会. 2017 年全国微波毫米波会议论文集(下册), 2017: 747-750.
- HUO P, WU J H, WANG ZH P, et al. Digital holographic reconstruction of antenna paanar near-field phaseless measurement [C]. National Microwave and Millimeter Wave Conference, 2017: 747-750.
- [18] GREGSON S, MCCORMICK J, PARINI C. Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements [M]. IET, 2007.
- [19] PARINI C, GREGSON S, MCCORMICK J, et al. Theory and practice of modern antenna range measurements [R]. IET, 2014.
- [20] KRIEL S G H, DE VILLIERS D I L. Probe positioning error sensitivity analysis for planar near-field antenna measurements [C]. URSI Asia Pacific Radio Science Conference, 2019.

作者简介



刘灵鸽(通信作者), 2001 年于郑州大学获得学士学位, 2004 年于西北工业大学获得硕士学位, 现为西安空间无线电技术研究所研究员, 主要研究方向为天线测量技术及新型天线测量系统设计。

E-mail: 13571871076@163.com

Liu Lingge (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Zhengzhou University in 2001 and M. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2004, respectively. Now she is a researcher in Xi'an Institute of Space Radio Technology. Her main research interests include antenna measurement technology and design of new antenna measurement system.