

# 球面多探头天线近场测试系统校准方法研究\*

胡楚锋<sup>1</sup>, 郭丽芳<sup>1,2</sup>, 李南京<sup>1</sup>, 陈卫军<sup>1</sup>, 郭淑霞<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室 西安 710065; 2. 西北工业大学电子信息学院 西安 710072)

**摘要:**球面多探头天线近场测试系统具有测试速度快,可获取待测天线的近场三维数据等优点。然而,多探头形成了多个测试通道,各通道不同的幅度和相位特性将会影响近场测试精度。针对各通道间的不一致性,首先对多探头系统进行机械校准,降低探头角度和位置误差;然后通过测量球面中心到每个探头的辐射信号进行电校准;仿真分析了系统误差和环境因素引起的幅相波动对近场数据外推远场方向图的影响。通过构建半球面多探头天线近场测试系统进行实验验证,结果表明了机械校准和电校准技术的有效性。将校准后的近场数据外推得到远场方向图,通过与远场测量方向图进行对比,验证了幅相误差对外推远场方向图的影响。

**关键词:** 天线近场测试;球面多探头系统;校准;幅相误差;外推

**中图分类号:** TN82 TH71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Study on the calibration method of spherical multi-probe antenna near-field measurement system

Hu Chufeng<sup>1</sup>, Guo Lifang<sup>1,2</sup>, Li Nanjing<sup>1</sup>, Chen Weijun<sup>1</sup>, Guo Shuxia<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on LAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China;

2. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Spherical multi-probe antenna near-field measurement system has the advantages of fast test speed and being able to acquire the three-dimensional near-field data of the antenna to be tested. However, multiple probes form multiple channels, and different amplitude and phase characteristics of various channels will affect near-field measurement accuracy. In order to eliminate the channel inconsistency, mechanical calibration of the multi-probe system is performed first, which reduces the angle and position errors of the probe. Then electrical calibration is performed through measuring the radiation signal from the center of sphere to each probe. Next, the influence of amplitude and phase errors caused by system errors and environment factors on the extrapolation of far-field radiation pattern from near-field data is simulated and analyzed. A semi-spherical multi-probe antenna near-field measurement system was built, and verification experiment was conducted. The results indicate the effectiveness of mechanical calibration and electrical calibration techniques. The calibrated near-field data was extrapolated to obtain far-field radiation pattern, and the obtained radiation pattern was compared with the measured far-field radiation pattern. The comparison result verifies influence of amplitude and phase errors on extrapolated far-field radiation pattern.

**Keywords:** antenna near-field measurement; spherical multi-probe system; calibration; amplitude and phase error; extrapolation

## 1 引言

天线近场测量不受外界环境的影响,具有测试精度高、保密性好、可全天候工作等优点。近场测量又分为平

面近场测量、柱面近场测量和球面近场测量<sup>[1]</sup>。平面近场测量和柱面近场测量分别针对笔形波束和扇形波束天线,测试速度慢,而球面近场测量可以适用于各种类型波束的天线,具有测试速度快、可获取待测天线三维全息近场数据等优点<sup>[2]</sup>。但是对于球面多探头天线测试系统来

说,多探头形成了多个测试通道,使得采集到的近场数据中叠加了通道差异的影响<sup>[3]</sup>。而对于球面近场测量技术,精确的天线近场幅度和相位数据才能重建出准确的远场信息。因此针对球面多探头天线近场测试系统,需要对通道的幅度和相位误差进行校准,消除通道不一致性的影响。

在国外,丹麦工业大学的学者们在20世纪70~80年代开始进行天线近场测量的研究。20世纪90年代,Laitinen T. A. 等人<sup>[4]</sup>提出了高阶探头补偿的方法,并通过实验进行了验证;1999年法国的SATIMO公司研制成功一种多探头球面近场天线测量系统<sup>[5]</sup>;2004年,SATIMO公司又研发出了SG128多探头球面近场电扫描三维测量系统。近些年出现了3种不同的技术用于球面近场天线测量中的高阶探针校正;2009年Schmidt C. H. 等人<sup>[6]</sup>提出了组合平面波和球面波的平面波近场技术;2010年Laitinen T 等人<sup>[7]</sup>提出的快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)矩阵反演技术,用于校准被测天线偏离测量坐标系原点的情况;以及Hansen T. B.<sup>[8]</sup>在2011年提出了系统矩阵技术,将其传输公式完全表示为一个线性方程组,并采用重新归一化法使正态矩阵接近单位矩阵;2013年,Foged L. J. 等人<sup>[9]</sup>基于空间滤波技术提出了两种针对天线近场测量的误差消除方法,实验结果表明,这两种方法可以有效改进天线辐射方向图;2016年Pivnenko S 等人<sup>[10]</sup>研究了使用单个探头校正文件处理球面近场天线测量多频结果的适用性。该方法简化了多频率测量中的数据处理,节省了探头校准成本。

在国内,西安海天天线公司将上述法国SATIMO公司的SG128球面近场测试系统引入后,又对其进行了一系列的创新改造工作,使得天线球面近场测量系统在我国得到了一次较大的发展<sup>[11]</sup>,并采用多场地对比法来鉴定天线测试场地测试准确度。西安电子科技大学、中电14所、中电54所、中电41所等科研单位都研制了天线测试系统<sup>[12-14]</sup>,但对于球面近场天线测试系统校准技术的报导较少。

本文提出了消除球面多探头天线近场测试系统通道不一致性的校准方法。首先介绍了球面多探头天线近场测试系统,推导了近场变换算法,然后针对球面多探头天线近场测试系统的通道不一致性,对其进行了机械校准和电校准。考虑到系统误差和环境因素的影响,仿真分析了校准后近场数据的幅相误差对外推方向图的影响。通过构建半球面多探头天线近场测试系统进行实验验证,结果表明了该校准方法的有效性,将校准后的近场数据外推得到远场方向图,与测试远场方向图对比,验证了幅相误差对外推方向图的影响。

## 2 天线近场测试技术

### 2.1 球面多探头天线近场测试系统

球面多探头天线近场测试系统用电子快速扫描代替传统的单探头机械扫描,具有测试速度快,可获取待测天线的近场三维数据等优点。球面多探头天线近场测试系统示意图如图1所示。

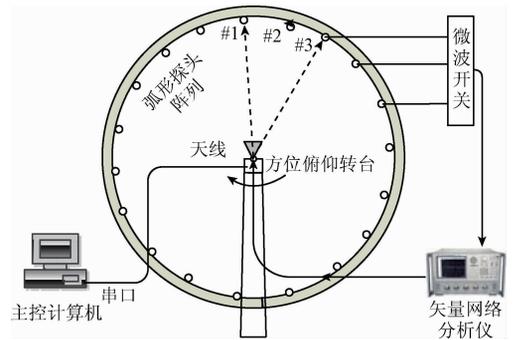


图1 球面多探头天线近场测试系统  
Fig.1 Spherical multi-probe antenna near-field measurement system

球面多探头天线近场测试系统的工作原理为在围绕待测天线的圆弧形轨道上,按照采样定理要求以一定角度间隔布置若干探头天线,探头天线通过电缆连接到由电子开关组成的开关矩阵上;待测天线固定在转台上并保证天线的相位中心在圆心上。测试时,待测天线将矢量网络分析仪产生的信号辐射出去,系统控制开关矩阵在各个接收探头天线间进行切换,并通过矢量网络分析仪采集到各个通道的接收数据,同时,系统控制天线转台旋转,并且在各个旋转角度上采集各接收探头数据即可完成球面数据的采集。

探头天线安装在扫描支架上,对于扫描架的设计首先要确定探头间的间隔,即采样间隔。通常为了达到工程精度,俯仰方向上的采样间隔可以通过下式计算<sup>[15]</sup>:

$$\Delta\theta \approx (0.2 \sim 0.3)\pi/kr_0 \quad (1)$$

式中: $r_0$ 表示以坐标原点为中心能包围待测天线的最小球面半径, $k$ 表示波数。如果用插值的方法处理俯仰方向上的数据,则采样间隔满足式(2)即可。利用插值的方法,一方面可以减少对 $\theta$ 方向上的采样点数,缩短测试时间;另一方面可以减少占用内存和计算时间。

$$\Delta\theta \approx (0.5 \sim 0.7)\pi/kr_0 \quad (2)$$

### 2.2 近场变换算法

假设包围待测天线的最小球面的半径为 $a$ ,那么在 $r \geq a$ 的无源区中,电场强度可以表示为矢量波函数 $M$ 和 $N$ 的线性组合<sup>[16]</sup>:

$$\mathbf{E}(r, \theta, \phi) = - \sum_n \sum_m \mathbf{a}_{mn} \mathbf{M}_{mn} + \mathbf{b}_{mn} \mathbf{N}_{mn} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{a}_{mn}$  和  $\mathbf{b}_{mn}$  为加权系数,球坐标系下的矢量波函数为:

$$\mathbf{M}_{mn}(r, \theta, \phi) = \mathbf{R}_{mn} h_n^{(2)}(kr) e^{jm\phi} \cdot \left[ \frac{j m P_n^{1|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} \mathbf{e}_\theta - \frac{dP_n^{1|m|}(\cos\theta)}{d\theta} \mathbf{e}_\varphi \right] \quad (4)$$

$$\mathbf{N}_{mn}(r, \theta, \phi) = \mathbf{R}_{mn} e^{jm\phi} \left\{ \frac{n(n+1)}{kr} h_n^{(2)}(kr) P_n^{1|m|}(\cos\theta) \mathbf{e}_r + \left[ \frac{dP_n^{1|m|}(\cos\theta)}{d\theta} \mathbf{e}_\theta + \frac{j m P_n^{1|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} \mathbf{e}_\varphi \right] \cdot \frac{1}{kr} \frac{d}{dr} [r h_n^{(2)}(kr)] \right\} \quad (5)$$

式中:  $P_n^{1|m|}(\cos\theta)$  为勒让德函数,  $h_n^{(2)}(kr)$  为球汉克尔函数。

$$\mathbf{R}_{mn} = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-|m|)!}{4\pi n(n+1)(n+|m|)!}} (-1)^m \quad (6)$$

将式(4)和(5)代入式(3),并利用球汉克尔函数的大宗量近似得到天线远场方向图为:

$$\mathbf{E}_\theta(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n j^n e^{jm\phi} [-m \mathbf{a}_{mn} \mathbf{K}_{mn} + \mathbf{b}_{mn} \mathbf{K}'_{mn}] \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_\phi(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n j^{n+1} e^{jm\phi} [-\mathbf{a}_{mn} \mathbf{K}'_{mn} + m \mathbf{b}_{mn} \mathbf{K}_{mn}] \quad (8)$$

式中:  $N$  为截断数,  $N \geq \pi \left( \frac{a}{\lambda} + 3 \right) \approx ka + 10$ 。

$$\mathbf{K}_{mn} = \mathbf{R}_{mn} \frac{P_n^{1|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} \quad (9)$$

$$\mathbf{K}'_{mn} = \mathbf{R}_{mn} \frac{dP_n^{1|m|}(\cos\theta)}{d\theta} \quad (10)$$

利用正交性及近场测试值得到加权系数为:

$$\mathbf{a}_{mn} = - \frac{1}{h_n^{(2)}(kr)} \left\{ \int_0^\pi \left[ \int_0^{2\pi} \mathbf{V}_\theta(r_0, \theta, \phi) e^{-jm\phi} d\phi \right] \cdot j m k_{mn} \sin\theta d\theta + \int_0^\pi \left[ \int_0^{2\pi} \mathbf{V}_\varphi(r_0, \theta, \phi) e^{-jm\phi} d\phi \right] \mathbf{k}'_{mn} \sin\theta d\theta \right\} \quad (11)$$

$$\mathbf{b}_{mn} = \frac{1}{kr \frac{d}{dr} [r h_n^{(2)}(kr)]} \left\{ \int_0^\pi \left[ \int_0^{2\pi} \mathbf{V}_\theta(r_0, \theta, \phi) e^{-jm\phi} d\phi \right] \cdot \mathbf{k}'_{mn} \sin\theta d\theta - \int_0^\pi \left[ \int_0^{2\pi} \mathbf{V}_\varphi(r_0, \theta, \phi) e^{-jm\phi} d\phi \right] j m k_{mn} \sin\theta d\theta \right\} \quad (12)$$

将求得的加权系数带入式(7)和(8)即可求得待测天线远场方向图。

### 3 校准方法

球面多探头天线近场测试系统的各个通道之间存在

不一致性,将会影响近场测试精度,从而导致外推方向图出现误差。为消除通道不一致性对近场测试数据的影响,对球面多探头天线近场测试系统进行机械校准和电校准。

#### 3.1 机械校准

拱形支架均匀安装有双极化探头天线,被测天线在方位转台的驱动下旋转一周,由探头阵列获得三维立体方向图。系统安装完成后,首先用激光测距仪进行对准,根据激光测距仪的读数分析每个探头的位置误差并微调探头,确保每个探头天线距离拱形架圆心的距离偏差  $\Delta R$  满足式(13),角度偏差  $\delta\theta$  满足式(14)<sup>[17]</sup>,其中  $F_Q$  为品质因数,对于球面近场测试系统  $F_Q$  取 20~100。

$$\Delta R \leq \lambda / F_Q \quad (13)$$

$$\delta\theta \leq \Delta\theta / F_Q \quad (14)$$

机械校准过程如图2所示,将激光测距仪安装在方位俯仰转台上,微调转台高度,使激光测距仪的测量原点即方位转轴尽可能与拱形支架圆心重合。首先调整俯仰转台,使激光测距仪对准1号探头天线,打开激光测距仪,调整1号探头的后座调整机构,使探头中心与激光测距仪光点的角度偏差满足式(14)要求,并测试1号探头与激光测距仪测量原点的距离记为  $R_1$ ;然后继续调整激光测距仪对准拱形架的2号探头天线,调整2号探头的后座调整机构,使探头中心与激光测距仪光点的角度偏差满足式(14)要求,测试并记录  $R_2$ ;比较  $R_1$  与  $R_2$ ,通过调整2号探头的后座调整机构,确保  $R_1$  与  $R_2$  的偏差小于等于  $\lambda / F_Q$ ;继续调整激光测距仪的俯仰角和方位角,以1号探头天线为基准,逐步对准拱形架天顶的其他探头天线,将拱形架上全部探头天线进行机械位置校准。

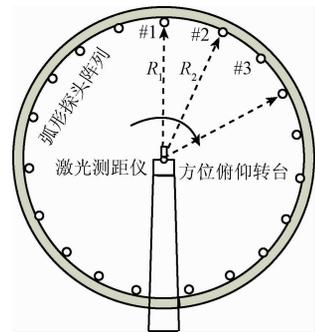


图2 机械校准示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mechanical calibration

#### 3.2 电校准

由于球面多探头天线近场测试系统结构复杂,除了要进行机械校准外,还要进行电校准。采用一个方向性好、带宽较宽的高增益标准天线作为校准天线分别对准圆弧阵列上各探头,记录该天线在精确对准探头情况下

的矢量幅度和相位数据,作为校准数据。这种方案对环境要求较低,可以进一步提高测试精度。

在距离探头天线相同的距离上,调整方位俯仰转台<sup>[18]</sup>使校准天线依次以最大辐射方向沿径向对准探头天线,矢量网络分析仪依次记录各通道的幅度和相位数据。由于校准天线每次都以最大辐射方向照射探头天线,因而消除了校准天线方向图特性的影响,在相同距离上接收和发射信号消除了路径距离不同的差异。将采集到的各通道数据记为  $C(\varphi, \theta)$ ,若采用该系统测量的被测天线的数据为  $F(\varphi, \theta)$ ,则通道的校准公式如下:

$$F_c(\varphi, \theta) = F(\varphi, \theta) / C(\varphi, \theta) \quad (15)$$

为了验证通道校准方法的有效性,可以改变校准天线到探头的距离,再次进行测量,对两次测量的数据进行对比分析,除了电磁波在空间中传播的距离不同,其他条件均相同,若两次测量的幅度差别较小,相位相差一个固定值,则可说明校准方法的有效性。

## 4 机械误差对外推结果的影响

随时间推移,系统机械结构会发生形变,以下仿真分析了探头机械位置误差对外推远场方向图的影响。仿真选择工作频率为 2.4 GHz(S 波段)的角锥喇叭天线。利用电磁仿真软件 HFSS 对天线进行建模仿真,角锥喇叭的馈电点位于波导宽边中心,距离短路板的距离为 1/4 波长,采用特性阻抗为 50  $\Omega$  的同轴线进行馈电。天线建模参数如表 1 所示,天线模型如图 3 所示。

表 1 天线建模参数

Table 1 Antenna simulation model parameters

工作 频率/GHz	波导尺寸/cm			喇叭口尺寸/cm		
	$a$	$b$	$h$	$a_1$	$b_1$	$h_1$
2.40	10.92	5.46	15.62	52.07	38.56	57.07

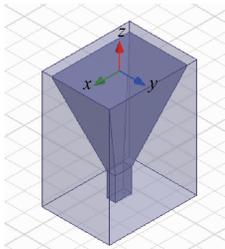


图 3 喇叭天线仿真模型

Fig. 3 Simulation model of pyramidal horn antenna

### 4.1 探头 R 位置误差

在距离角锥喇叭  $10\lambda$  的近场采样球面上获得采样数据,采样间隔满足采样定理。比较采样半径为  $10\lambda$  与采

样半径为  $10\lambda \pm \Delta R$  的外推远场方向图,  $\Delta R$  为 1 cm 时,比较结果如图 4 所示,分析探头 R 位置误差导致的旁瓣不确定度结果如表 2 所示。

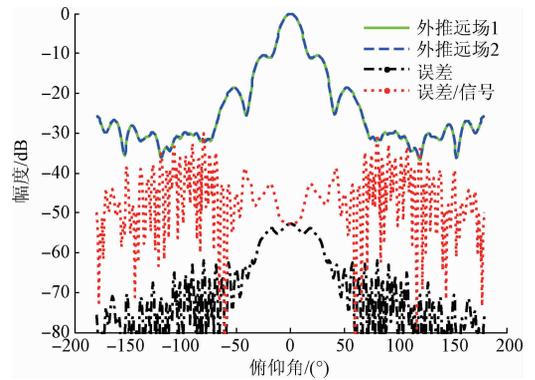


图 4 探头 R 误差对外推远场方向图的影响 ( $\Delta R = \pm 1$  cm)

Fig. 4 Influence of probe R errors on extrapolated far field radiation pattern ( $\Delta R = \pm 1$  cm)

图 4 中实线为采样球面半径为  $10\lambda$  时的外推远场方向图;虚线为采样球面半径为  $10\lambda + \Delta R$  ( $\Delta R = \pm 1$  cm) 时的外推远场方向图;带圆点的点划线表示实线和虚线的差值,即探头 R 位置误差 1 cm 时,将会在外推远场方向图引入 -52 dB 的误差信号;带方块虚线表示误差信号与天线辐射信号的比值,将该比值代入式(16)计算得出探头 R 位置误差 1 cm 导致 -10 dB 副瓣不确定度<sup>[19]</sup> 0.06 dB,导致 -20 dB 副瓣不确定度 0.09 dB。

$$\Delta^\pm = 20 \cdot \log[1 \pm 10^{\frac{\text{error}}{10}}] \quad (16)$$

表 2 探头 R 误差导致的不确定度

Table 2 Uncertainty caused by probe R errors

$\Delta R/\text{mm}$	-10 dB 副瓣不确定度/dB	-20 dB 副瓣不确定度/dB
5	0.03	0.08
10	0.06	0.09
15	0.09	0.15
20	0.13	0.20
25	0.15	0.26
30	0.18	0.35

### 4.2 探头 $\theta$ 位置误差

探头  $\theta$  位置形变  $\pm 0.05^\circ$  时引入的远场误差如图 5 所示,探头  $\theta$  位置误差引起的旁瓣不确定度结果如表 3 所示。分析图 5 可得探头  $\theta$  位置形变  $0.05^\circ$ ,将会在外推远场方向图引入 -56 dB 的误差信号,导致 -10 dB 副瓣不确定度 0.043 dB,导致 -20 dB 副瓣不确定度 0.15 dB。

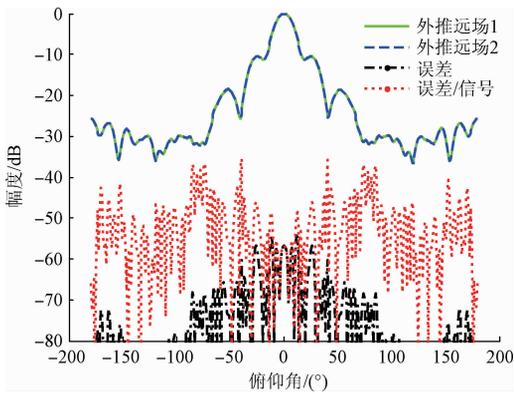


图5 探头  $\theta$  误差对外推远场方向图的影响 ( $\Delta\theta = \pm 0.05^\circ$ )

Fig. 5 Influence of probe  $\theta$  errors on extrapolated far field radiation pattern ( $\Delta\theta = \pm 0.05^\circ$ )

表3 探头  $\theta$  误差导致的不确定度

Table 3 Uncertainty caused by probe  $\theta$  errors

$\Delta\theta/(\circ)$	-10 dB 副瓣不确定度/dB	-20 dB 副瓣不确定度/dB
0.05	0.04	0.15
0.1	0.07	0.18
0.5	0.36	0.46
1	0.64	1.12

### 4.3 探头 $\varphi$ 位置误差

探头在  $\varphi$  方向上形变  $\pm 0.5^\circ$  时引入的远场误差如图6所示,分析图6可得探头  $\varphi$  位置形变  $\pm 0.5^\circ$ ,将会在外推远场方向图引入  $-68$  dB 的误差信号,导致  $-10$  dB 副瓣不确定度  $0.035$  dB,导致  $-20$  dB 副瓣不确定度  $0.007$  dB。

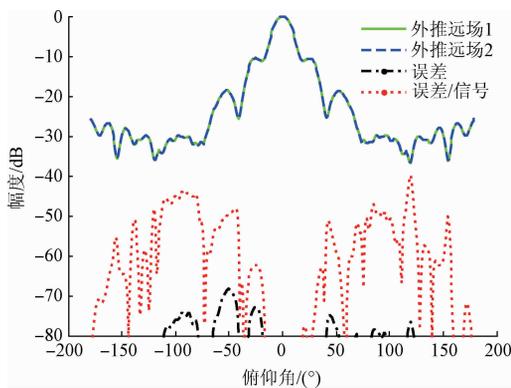


图6 探头  $\varphi$  误差对外推远场方向图的影响 ( $\Delta\varphi = \pm 0.5^\circ$ )

Fig. 6 Influence of probe  $\varphi$  errors on extrapolated far field radiation pattern ( $\Delta\varphi = \pm 0.5^\circ$ )

由以上分析可得,外推远场方向图对探头  $R$  和  $\theta$  位置的形变比较敏感,探头  $\varphi$  方向上的形变对其影响较小。

为减小机械变动对测量结果的影响,应定期对系统进行测量调试。

## 5 幅相误差对外推结果的影响

经过机械校准和电校准后,基本消除了通道差异引起的幅相误差,但是,受到系统误差和测量环境的影响,接收的幅相信息中包含了未知的幅相误差,这将导致近场测试数据不够精确,使得外推后效果下降。以下分析中天线建模参数如表1所示,天线模型如图3所示。

### 5.1 幅度误差对外推结果的影响

对近场幅度数据分别加入  $0 \sim 3$  dB,间隔  $0.5$  dB 的随机幅度误差,并带入外推算算法得到远场方向图,比较加入幅度误差前后的外推方向图,并记录两者差值,取多次实验的平均值作为最终实验结果,如图7所示。分析图7可得,幅度误差对外推方向图的影响较小,幅度误差大于  $2.8$  dB 时,外推方向图  $-10$  dB 副瓣误差大于  $0.5$  dB;幅度误差大于  $3$  dB 时,外推方向图  $-20$  dB 副瓣误差大于  $1$  dB。

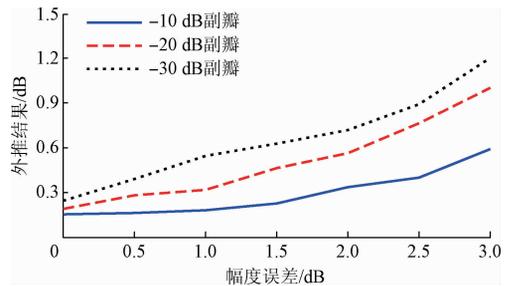


图7 幅度误差对外推远场方向图影响

Fig. 7 Influence of amplitude errors on extrapolated far field radiation pattern

### 5.2 相位误差对外推结果的影响

对近场相位数据分别加入  $0^\circ \sim 40^\circ$ ,间隔  $5^\circ$  的随机相位误差,比较加入相位误差前后的外推方向图,并记录两者的差值,取多次实验结果的平均值作为最终实验结果,如图8所示。

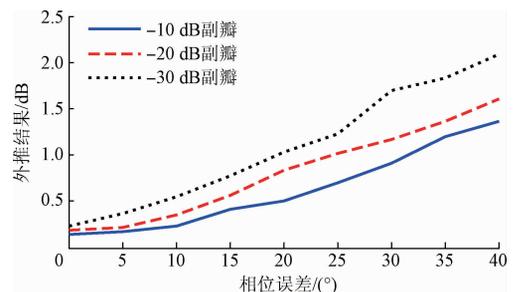


图8 相位误差对外推远场方向图的影响

Fig. 8 Influence of phase errors on extrapolated far field radiation pattern

分析图8可得相位误差对外推方向图的影响较大,相位误差大于 $30^\circ$ 时,外推方向图 $-10\text{ dB}$ 副瓣误差大于 $1\text{ dB}$ ;相位误差大于 $25^\circ$ 时,外推方向图 $-20\text{ dB}$ 副瓣误差大于 $1\text{ dB}$ 。

### 5.3 幅相误差对外推结果的影响

实际测试天线方向图时,既存在幅度误差也存在相位误差,以下仿真分析了幅度和相位误差同时存在时,外推方向图的误差值。图9所示为对仿真的近场幅度数据加入最大幅度为 $2.5\text{ dB}$ 的随机幅度误差,对仿真的近场相位数据加入最大幅度为 $20^\circ$ 的随机相位误差,幅相波动前后外推远场E面方向图与仿真远场E面方向图的对比结果。结果表明幅度误差 $2.5\text{ dB}$ ,相位误差 $20^\circ$ 将会导致外推远场方向图 $-10\text{ dB}$ 副瓣误差 $0.7\text{ dB}$ 。

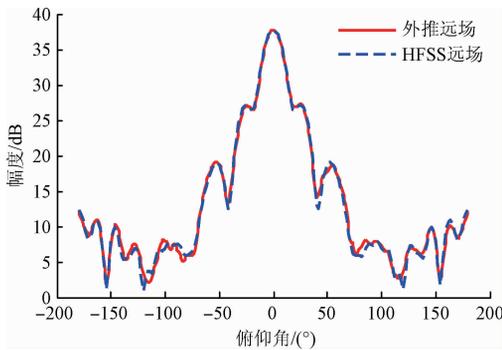


图9 幅相波动后外推方向图与仿真方向图比较

Fig. 9 Comparison between extrapolated far-field radiation pattern with amplitude and phase variation and simulation far-field radiation pattern

图10所示为多次实验结果的平均值,横轴为相位误差,纵轴为幅相误差导致外推方向图在 $-10\text{ dB}$ 副瓣的误差。分析结果表明,当幅度误差大于 $1.5\text{ dB}$ ,相位误差大于 $20^\circ$ 时,外推方向图 $-10\text{ dB}$ 副瓣误差大于 $0.5\text{ dB}$ 。

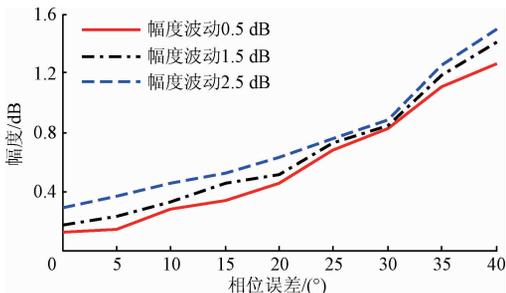


图10 幅相误差对外推远场方向图 $-10\text{ dB}$ 副瓣的影响

Fig. 10 Influence of amplitude and phase errors on  $-10\text{ dB}$  side-lobe of extrapolated far field radiation pattern

仿真分析结果表明,幅度误差对外推方向图的影响较小,相位误差对外推方向图的影响较大,外推误差随幅相误差的增大而增大,两者近似成线性关系。

## 6 实验结果

在西北工业大学无人机特种技术重点实验室构建了半球面多探头天线近场测试系统。弧形支架上交错布置18个双极化宽带探头天线,探头天线工作频率范围为 $1\sim 3\text{ GHz}$ 。探头之间的角度间隔为 $10^\circ$ ,方位转台旋转 $360^\circ$ 配合探头天线的交错布置使得采样间隔为 $5^\circ$ ,满足采样定理。测试时,被测天线在方位转台的驱动下在方位面旋转一周,由探头阵列获得球面立体方向图。

### 6.1 机械校准

本半球面天线近场测试系统的接收探头天线到拱形支架圆心的距离为 $1\ 364\text{ mm}$ ,测试探头天线与激光测距仪测量原点的距离,观察其与 $1\ 364\text{ mm}$ 的偏差,机械校准过程如图11所示。校准结果如图12和13所示,分析机械校准数据可得:除两端个别探头天线外,角度偏差 $\delta\theta \leq 0.05^\circ$ ;两端探头天线到拱形架几何中心的距离在 $1\ 364 \pm 5\text{ mm}$ 范围内,中间6个探头天线由于受重力的影响,距离稍微偏短。由式(13)和(14)计算得知,机械精度为 $\Delta R \leq 5\text{ mm}$ , $\delta\theta \leq 0.05^\circ$ 时,该系统的最大工作频率为 $3\text{ GHz}$ ,与接收探头天线的工作频率一致。

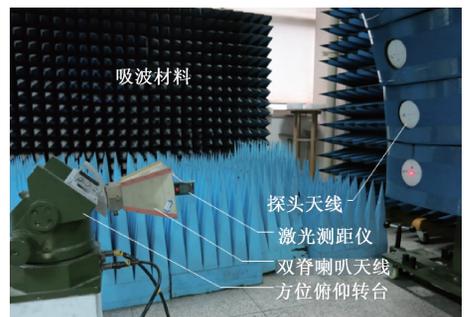


图11 校准装置及激光测距仪

Fig. 11 Calibration equipment and laser rangefinder

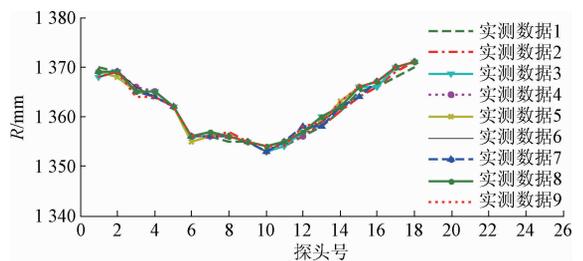


图12 探头R位置测试结果

Fig. 12 Probe R position test result

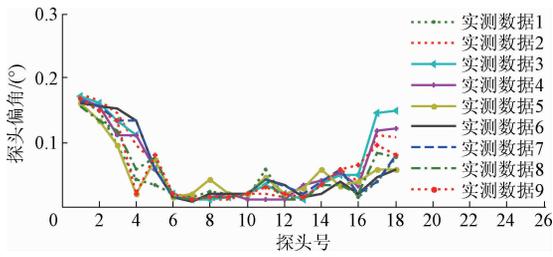


图 13 探头偏角测试结果

Fig. 13 Probe angle deviation test result

分析图 12 可得, 多次测量  $R$  偏差小于 2 mm, 对照表 2 可得, 2 mm 的  $R$  偏差导致外推远场方向图 -10 dB 副瓣不确定度小于 0.03 dB。分析图 13 可得, 除两端个别探头外, 探头偏角基本在 0.05° 范围内, 对照表 3 可得, 0.05°  $\theta$  角度偏差导致外推远场方向图 -10 dB 副瓣不确定度 0.04 dB。说明了机械校准过程的良好重复性和测试系统较高的稳定性。

### 6.2 电校准

采用双脊喇叭天线进行电校准, 并记录校准幅度和相位数据, 电校准示意图如图 14 所示, 比较不同距离下的校准结果如表 4 所示。分析表 4 中校准数据可得: 不同距离下接收探头幅度值的差异小于 0.3 dB, 相位差基本为 4°, 说明该校准方法的有效性。分析图 15 和 16 两次校准幅度和相位数据比较结果可得, 重复测量两次校准数据幅度偏差小于 0.1 dB, 相位偏差小于 0.3°, 说明了电校准过程的良好重复性和测试系统较高的稳定性。

表 4 电校准数据表

Table 4 Electrical calibration data table

探头位置	距离 1		距离 2	
	幅度/dB	相位/(°)	幅度/dB	相位/(°)
42.5	-22.5	45.9	-22.6	42.1
32.5	-22.5	59.5	-22.4	55.5
22.5	-22.7	51.7	-22.9	48.1
12.5	-23.0	55.0	-23.2	50.8
2.5	-22.4	68.8	-22.5	65.1
7.5	-22.4	79.9	-22.8	83.7
17.5	-23.2	70.2	-23.5	74.4
27.5	-22.8	87.0	-23.2	91.1
37.5	-22.7	46.1	-23.1	50.2
47.5	-22.8	40.8	-23.1	44.8

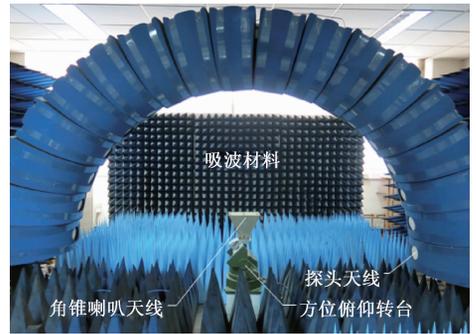


图 14 电校准示意图

Fig. 14 Schematic diagram of electrical calibration

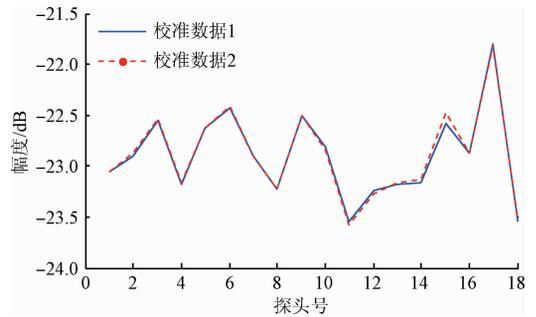


图 15  $\varphi$  极化两次校准幅度数据比较

Fig. 15 Comparison of  $\varphi$  polarized two calibration amplitude data



图 16  $\varphi$  极化两次校准相位数据比较

Fig. 16 Comparison of  $\varphi$  polarized two calibration phase data

### 6.3 测试结果

采用标准增益喇叭天线 BJ22 对校准方法的性能进行验证, 测试过程如图 17 所示。标准增益喇叭天线 BJ22 天线口径面的最大尺寸约为 0.5 m, 设置工作频率为 2.4 GHz, 根据频率可以计算出所需满足的远场条件为 4 m, 在现有系统的测试距离下, 满足近场测试条件。设置方位转台的转速为 2°/s, 方位角采样间隔为 1°, 转台旋转 360°, 设置中频带宽为 1 kHz。

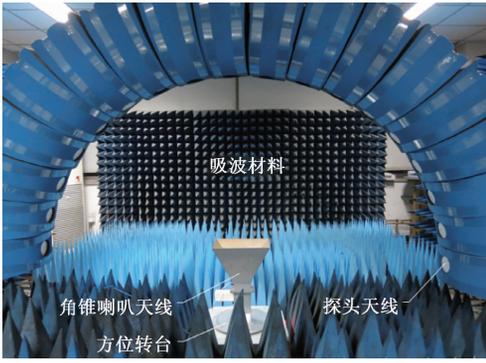
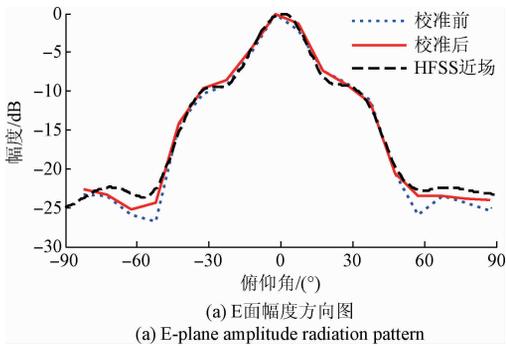


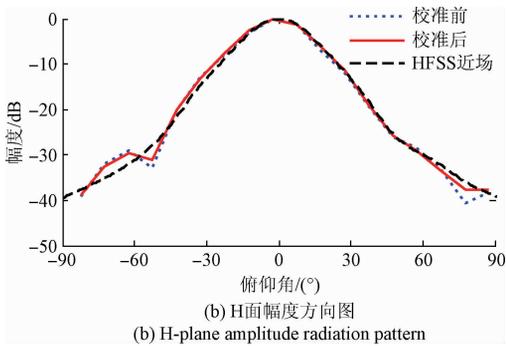
图 17 半球面多探头天线近场测试系统

Fig. 17 Hemi-spherical multi-probe antenna near-field measurement system

将测试所得数据进行校准,得到标准增益喇叭天线BJ22 E面和H面的幅度和相位方向图;对比实验数据校准前后幅相方向图和 HFSS 仿真近场幅相方向图,如图 18 和 19 所示。从图 18 和 19 中可以看出,受到各通道幅相差异的影响,测量的幅度和相位方向图产生畸变,校准后的方向图与仿真近场方向图吻合良好,说明了通道校准的有效性。



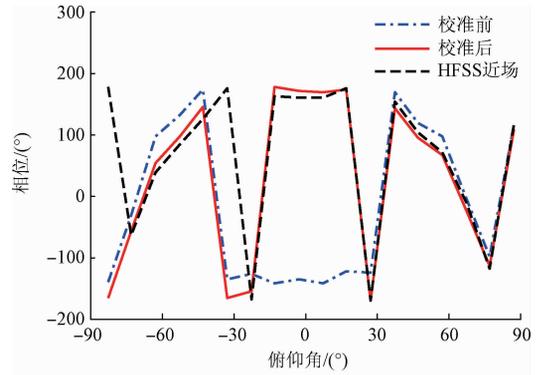
(a) E-plane amplitude radiation pattern



(b) H-plane amplitude radiation pattern

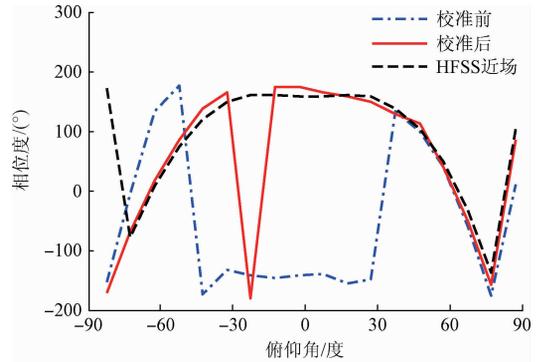
图 18 幅度方向图校准前后比较

Fig. 18 Comparison of amplitude radiation patterns before and after calibration



(a) E面相位方向图

(a) E-plane phase radiation pattern



(b) H面相位方向图

(b) H-plane phase radiation pattern

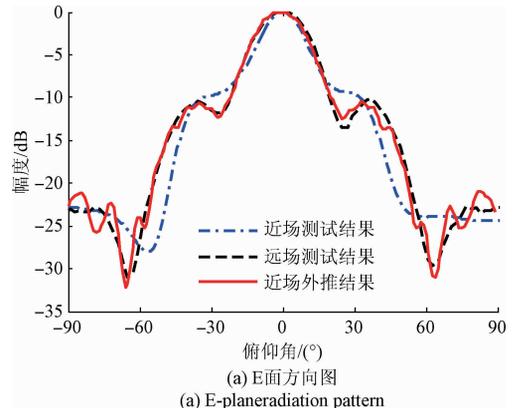
图 19 相位方向图校准前后比较

Fig. 19 Comparison of phase radiation patterns before and after calibration

分析图 18 得到校准后的幅度方向图与仿真近场幅度方向图在主瓣吻合良好,副瓣最大差值为 2.5 dB,分析图 19 得到校准后的相位方向图与仿真近场相位方向图的最大差值为 20°。

### 6.4 幅相误差对外推方向图的影响

将校准后的近场实验数据外推得到的外推方向图与远场方向图对比,如图 20 所示。



(a) E面方向图

(a) E-planeradiation pattern

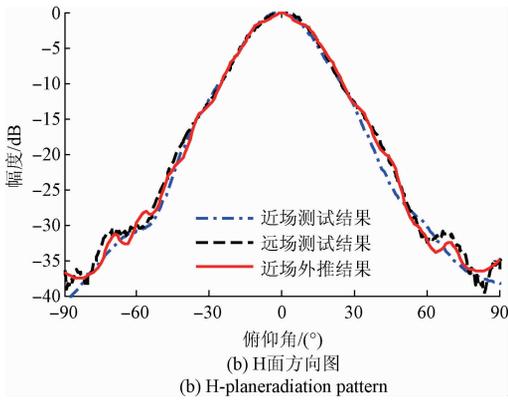


图20 外推方向图与远场方向图比较

Fig. 20 Comparison of extrapolated far-field radiation pattern and reference far-field radiation pattern

从图20中可以看出校准后实验数据的外推方向图与测试远场方向图吻合良好,在-10 dB副瓣处,外推方向图误差在0.7 dB范围内。与图10中的仿真分析结果一致,验证了幅相误差对外推远场方向图影响。

## 7 结 论

球面多探头天线近场测试系统测试得到的近场数据中叠加了通道不一致性的影响,通过机械校准和电校准有效消除了通道不一致性引起的幅度和相位偏差。同时,仿真分析了探头机械位置形变和校准后近场数据的幅相误差对外推方向图的影响,并通过实验进行了验证,结果表明外推误差随近场幅相误差的增大而增大,两者基本呈线性关系,该分析结果可指导多探头球面近场测试系统的设计,将幅相误差控制在可容忍范围内。

## 参考文献

- [1] 张福顺,焦永昌,毛乃宏. 天线近场测量的综述[J]. 电子学报, 1997, 25(9): 74-77, 63.  
ZHANG F SH, JIAO Y CH, MAO N H. An outline of near-field antenna measurement [J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(9): 74-77.
- [2] 毛乃宏,俱新德. 天线测量手册[M]. 北京:国防工业出版社,1987: 222-253.  
MAO N H, JU X D. Antenna measurement handbook[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1987: 222-253.
- [3] BREINBJERG O. Spherical near-field antenna measurements [C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, 2016: 1019-1020.
- [4] LAITINEN T A, PIVNENKO S, BREINBJERG O.

- Iterative probe correction technique for spherical near-field antenna measurements [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005, 4(1): 221-223.
- [5] IVERSEN P O, GARREAU P, BURRELL D. Real-time spherical near-field handset antenna measurements [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, 43(3): 90-94.
- [6] SCHMIDT C H, EIBERT T F. Multilevel plane wave based near-field far-field transformation for electrically large antennas in free-space or above material halfspace [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(5): 1382-1390.
- [7] LAITINEN T, PIVNENKO S, NIELSEN J M, et al. Theory and practice of the FFT/Matrix inversion technique for probe-corrected spherical near-field antenna measurements with high-order probes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(8): 2623-2631.
- [8] HANSEN T B. Spherical near-field scanning with higher-order probes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(11): 4049-4059.
- [9] FOGED L J, SCIALACQUA L, MIOC F, et al. Echo suppression by spatial-filtering techniques in advanced planar and spherical near-field antenna measurements [AMTA Corner] [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2013, 55(5): 235-242.
- [10] PIVNENKO S, VENERO E, RIZZO C. Application of single probe correction file for multi-frequency spherical near-field antenna measurements [C]. 10<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation, 2016: 1-5.
- [11] 陈锡斌,芦永超,张霖,等. 多探头球面近场测量系统及其创新改造工作 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2007, 2(6): 635-639, 643.  
CHEN X B, LU Y CH, ZHANG L, et al. Multi-probe spherical near-field test system and its innovation work [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2007, 2(6): 635-639, 643.
- [12] 王亚海,刘伟,常庆功. 170-325 GHz 频段天线测试系统方案设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(12): 1195-1199.  
WANG Y H, LIU W, CHANG Q G. The scheme design of 170-325 GHz wave band antenna test system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(12): 1195-1199.
- [13] 李勇,欧杰,徐平. 平面近场天线测量误差分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(11): 987-992.  
LI Y, OU J, XU P. Errors analysis of planar near-field

- antenna measurement [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(11): 987-992.
- [14] QURESHI M, SCHMIDT C, EIBERT T. Adaptive sampling in spherical and cylindrical near-field antenna measurements [ J ]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2013, 55(1): 243-249.
- [15] 李南京, 李元新, 胡楚锋. 球模式展开理论近远场变换及快速算法 [ J ]. 电子与信息学报, 2015, 37(12): 3025-3029.
- LI N J, LI Y X, HU CH F. Near-Field to far-field transformations based on spherical wave expansions and fast algorithm [ J ]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(12): 3025-3029.
- [16] PELLAND P, HINDMAN G, NEWELL A. Advances in automated error assessment of spherical near-field antenna measurements [ C ]. 7th European Conference on Antennas and Propagation, 2013: 793-797.
- [17] 贾建援, 柴伟, 于大林, 等. 方位俯仰转台误差参数辨识与指向精度分析 [ J ]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1500-1508.
- JIA J Y, CHAI W, YU D L, et al. Error parameters identification and pointing accuracy analysis of an azimuth-elevation turntable [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1500-1508.
- [18] 宋明顺, 方兴华, 黄佳, 等. 校准和检测中微小样本测量不确定度评定方法研究 [ J ]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 419-426.
- SONG M SH, FANG X H, HUANG J, et al. Research on the measurement uncertainty evaluation method of infinitesimal sample in calibration and testing [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2): 419-426.

## 作者简介



**Hu Chufeng** received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Northwestern Polytechnical University in 2004, 2007 and 2010, respectively. Now, he is an associate professor in Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University. His research interest includes microwave measurement and radar imaging, and microwave remote sensing.



**Guo Lifang** (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 2015 from Shanxi Agricultural University. Now she is a master student in Northwestern Polytechnical University. Her main research interest is antenna near-field measurement.



**Li Nanjing** received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Northwestern Polytechnical University in 1998, 2001 and 2006, respectively. Now, he is an associate professor in Northwestern Polytechnical University. His research interest includes microwave measurement.

**胡楚锋**, 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, 主要研究方向为微波测量及雷达成像、微波遥感。

E-mail: huchufeng1982@163.com

**郭丽芳** (通讯作者), 2015 年于山西农业大学获得学士学位, 现为西北工业大学硕士, 主要研究方向为天线近场测量。

E-mail: 619997502@qq.com

**Guo Lifang** (Corresponding author)

received her B. Sc. degree in 2015 from Shanxi Agricultural University. Now she is a master student in Northwestern Polytechnical University. Her main research interest is antenna near-field measurement.

**李南京**, 分别在 1998 年、2001 年和 2006 年于西北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为西北工业大学副教授, 主要研究方向为微波测量。

E-mail: linanjing76@163.com

**Li Nanjing** received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Northwestern Polytechnical University in 1998, 2001 and 2006, respectively. Now, he is an associate professor in Northwestern Polytechnical University. His research interest includes microwave measurement.