

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.04.018

引用格式:焦禹,陈文俊.有源相控阵天线的近场校准[J].电讯技术,2016,56(4):453-457. [JIAO Yu, CHEN Wenjun. Near-field calibration of active phased array antenna[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(4):453-457.]

有源相控阵天线的近场校准*

焦禹**,陈文俊
(南京船舶雷达研究所,南京 210015)

摘要:为实现对相控阵天线的校准,降低幅相误差和阵元失效对天线性能的影响,提出了一种考虑互耦效应的近场校准方法。在利用近场扫描法完成逐一通道校准的基础上,使用旋转矢量法进行二次校准。在应用旋转矢量法(REV)时,为使被测信号的变化明显,将大规模相控阵天线分为中间、边缘区域进行分区校准。通过二次校准可判定阵元是否失效,提高相控阵天线的幅相一致性;通过分区校准减小阵元间互耦的影响,缩短校准时间。仿真结果表明:此方法用于大型相控阵的校准具有较高的准确性,可改善校准结果。

关键词:相控阵天线校准;旋转矢量法;近场扫描法;互耦效应;幅相一致性

中图分类号:TN820 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)04-0453-05

Near-field Calibration of Active Phased Array Antenna

JIAO Yu, CHEN Wenjun
(Nanjing Marine Radar Institute, Nanjing 210015, China)

Abstract: In order to calibrate the phased array antenna and reduce the impact of element failure and amplitude-phase errors, this paper proposes a calibration method which considers the mutual coupling. On the basis of the calibration with the near-field scanning method, the elements are calibrated by the rotating element electric-field vector (REV) method. With the REV method, the large-scale phased array antenna is distributed into some small areas such as middle areas and edge areas to make the signal vary more significantly. The re-calibration method can find out the failure elements and improve the phased array antenna's amplitude-phase consistency. The calibration of sub-region with the REV method can diminish the effect of the mutual coupling and shorten the calibration period. The simulations validate that the method has a good accuracy to calibrate the large-scale phased array antenna and can improve the calibration results.

Key words: phased array antenna calibration; rotating element electric-field vector method; near-field scanning method; mutual coupling effect; amplitude-phase consistency

1 引言

由于制造公差和天线互耦的影响,天线各通道间通常存在较大的幅相误差,因此需对其进行校准,使天线性能达到设计要求。现阶段常用的天线校准方法有快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)法、矩阵求逆法、近场扫描法、旋转矢量法、互

耦校准法、换相法等^[1-2]。近场扫描法^[2-3]操作简单,但忽略阵元间存在的互耦效应,因此难以精确地修正通道间的幅相误差。文献[4]提出的互耦技术校准无需外场测量装置,但要求各阵元通道可以独立控制其工作状态,仅适用于相控阵天线的机内测试系统。文献[5]介绍的换相法通过引入Walsh函

* 收稿日期:2015-09-24;修回日期:2015-12-16 Received date:2015-09-24;Revised date:2015-12-16

** 通信作者:jiaoyu0918@163.com Corresponding author:jiaoyu0918@163.com

数、Hadamard 矩阵等生成特殊的实验步骤控制矩阵,一次测量即可校准所有单元。此方法需补充先验信息如测量探头的方向特性和位置,目前仅应用于星载相控阵天线的校准。旋转矢量法(Rotating Element Electric-field Vector, REV)在探头位置、测量单元个数等方面选择灵活^[6-7],但使用 REV 对全部阵元进行校准所需时间较长,计算量大,而且大型天线阵面中单个天线单元相位的改变对整个天线阵发射信号的幅度影响很小,检测比较困难。

本文根据近场扫描法与旋转矢量法,提出了一种新的校准方法。在近场扫描法的基础上,使用旋转矢量法进行二次校准方法,以降低阵元间互耦的影响。大型天线阵面校准时将阵元分为中间区域与边缘区域,对各个分区内的单元校准。最后采用半波振子阵列天线模型对此方法进行了验证。

2 近场校准原理及方案设计

2.1 相控阵天线误差分析和校准原理

相控阵天线发射波束是阵列中所有天线单元辐射电磁波的矢量合成,各个单元初始的幅相误差、阵元失效以及互耦引起的误差对天线的波束形成有重要影响。阵元失效在很多方面类似于随机误差^[1],可使波束指向偏离理论值,旁瓣抬高,增益下降。互耦会改变阵列信号的幅度和相位,对天线阵的增益、副瓣电平、波束宽度等电参数有一定影响^[8-9]。

相控阵天线近场校准的目的是尽量减小各通道之间幅度和相位误差。只考虑各阵元的独立作用并利用天线近场测量设备对天线通道依次校准的方法称为近场扫描法^[3]。位于第 m 行、 n 列单元发射的信号以复数形式表示为

$$X_{mn}(t) = a_{mn}(1 + \delta_{mn}) \exp[j(2\pi f_d t + \phi_{mn} + \sigma_{mn})] \tag{1}$$

式中: a_{mn} 、 ϕ_{mn} 为该单元的幅度相位; δ_{mn} 、 σ_{mn} 为幅度相位误差; f_d 为校准信号频率。选定参考单元(c, d),将其他通道的发射信号依次与 $X_{cd}(t)$ 比较,可得校准系数 M :

$$M(m, n) = \frac{X_{mn}}{X_{cd}} = \frac{1 + \delta_{mn}}{1 + \delta_{cd}} \exp(j \cdot (\sigma_{mn} - \sigma_{cd})) \tag{2}$$

旋转矢量法进行校准时,全部阵元均处于工作状态,改变某一单元的相位,根据探头所接收到的信号的幅度变化与该单元相位的关系,可求出该单元相对幅度 K 与相对相位 $X^{[7]}$ 。

$$K = \frac{\Gamma}{\sqrt{1 + 2\Gamma \cos \Delta_0 + \Gamma}}, X = \arctan\left(\frac{\sin \Delta_0}{\sin \Delta_0 + \Gamma}\right) \tag{3}$$

式中: $\Gamma = \left| \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right|$, $E_{\max}$ 、 $E_{\min}$ 为合成场矢量的最大值与最小值; Δ_0 为合成场矢量最大时该单元对应的相位变化量。移动探头,重复此步骤完成全部阵面单元的校准。由于校准过程需多次改变各单元的相位,所需校准时间较长。

2.2 幅相校准流程及算法

相控阵天线进行发射通道校准时,各通道信号较强,工程上常采用近场扫描法进行校准。由于忽略互耦效应,校准后天线幅度仍有大约 1 dB 的随机误差,相位会带有 20° 左右的随机误差。应用旋转矢量法校准,天线校准的结果较为准确,若故障单元较多,则会影响校准结果。

为修正各单元之间的幅相误差并提高天线校准效率,提出在近场扫描法的基础上应用旋转矢量法对阵面进行二次校准。近场幅相校准算法流程如图 1 所示, M 为阵元总个数, B 为移相器位数。阵元移相器需开启的量值为 $\theta = \theta_{\text{test}0} + \theta_{\text{test}} - \theta_{\text{org}}$ 。式中: $\theta_{\text{test}0}$ 为由近场扫描法得到的校准相位; θ_{test} 为通过旋转矢量法得到的校准相位; θ_{org} 为该单元的初始相位。补相的过程存在由于移相器位数限制而产生的误差。

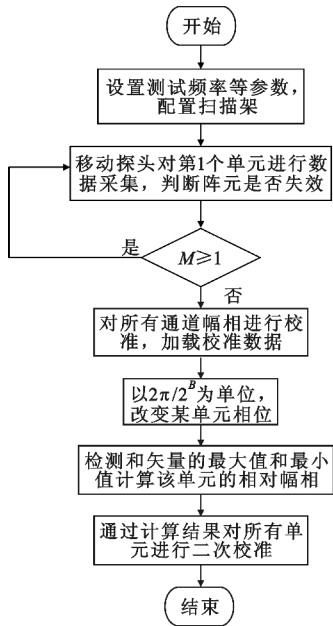


图 1 近场幅相校准算法流程
Fig. 1 Flow chart of the amplitude-phase calibration

采用旋转矢量法进行校准且天线阵面规模较大时,单个天线单元相位的改变对探头所接收到的信

号的幅度影响很小, 可根据阵面的特点及测量精度等要求对天线分区。由于阵面中间单元周围的电磁环境相似, 电流分布基本相同, 因此互耦对中间各单元的电流幅度影响较小^[8], 但对边缘各单元有较大影响, 可将大阵分为中间区域与边缘区域。

对阵面进行二次校准的目的是修正由阵元间互耦引起的相位误差。小阵中间单元与大阵阵中单元互耦状态相同, 因此通过旋转矢量法求出小阵阵中单元的幅度相位, 即可推出大阵中单元互耦。大阵校准可先采用近场扫描法对大型天线阵面的发射通道进行校准, 将天线阵面分为中间区域和边缘区域。在天线的每个分区中选取小型参考阵面应用旋转矢量法对其进行二次校准, 对区域内的测量数据进行处理, 将其幅度、相位校准到与参考阵面相同。此方法可在扫描过程中判别阵元是否失效, 先后采用两种校准方法修正阵元之间的幅相误差, 通过旋转矢量法的二次校准降低互耦对阵列的影响。

3 系统模型

待测天线模型为以 $M \times N$ 个半波振子构成的矩形阵列天线, 阵列单元沿 x 轴、 y 轴间距分别为 d_x 、 d_y , 理想扫描面与待测天线阵面距离 d 。扫描面上沿 x 方向的取样点数为 M' , 采样间隔 Δx ; y 方向取样点数为 N' , 采样间隔 Δy 。图 2 为天线校准模型。

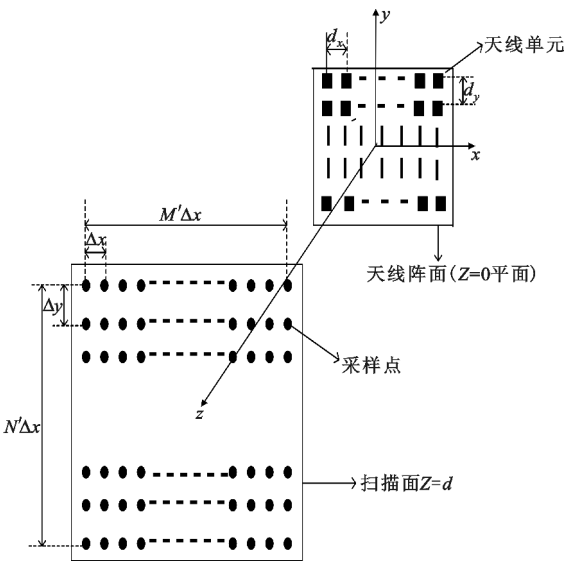


图 2 天线校准模型
Fig. 2 The antenna calibration model

根据叠加原理, 半波振子阵列天线远场 E 面方向图^[10]:

$$f_E(\theta) = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \sin \theta)}{\cos(\theta)} \left| \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} I_{mn} \exp(jkmd_x \sin \theta) \right| \quad (4)$$

式中: $I_{mn} = I_m \cdot I_n$ 为阵列单元上电流的相对幅相分布。

阵中 (m, n) 号单元中心坐标为 $(md_x, nd_y, 0)$, 第 (m, n) 号阵元在扫描面内任意一点的近场:

$$E_{1x}(x, y, z) = -j \cdot 30 I_{mn} \left[\frac{\exp(-jkR_{mn1})}{R_{mn1}} + \frac{\exp(-jkR_{mn2})}{R_{mn2}} \right] \quad (5)$$

式中: R_{mn1} 、 R_{mn2} 分别为振子上、下端点到探头的距离;

$$R_{mn1} = \sqrt{\left(x - md_x - \frac{\lambda}{4}\right)^2 + (y - nd_y)^2 + z^2}; \quad (6)$$

$$R_{mn2} = \sqrt{\left(x - md_x + \frac{\lambda}{4}\right)^2 + (y - nd_y)^2 + z^2} \quad (7)$$

根据叠加定理, 扫描面内任意一点的近场:

$$E_{2x}(x, y, z) = -j \cdot 30 \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} I_{mn} \left[\frac{\exp(-jkR_{mn1})}{R_{mn1}} + \frac{\exp(-jkR_{mn2})}{R_{mn2}} \right] \quad (8)$$

根据近远场变换公式天线阵远场 E 面方向图:

$$f_E(\theta, \phi) = \frac{\Delta x \Delta y}{4\pi^2} \left| \sum_{m=-\frac{M'}{2}}^{\frac{M'}{2}} \sum_{n=-\frac{N'}{2}}^{\frac{N'}{2}} E_{2x}(x, y, z) \cdot \exp(j \cdot k_x \cdot m \cdot \Delta x + j \cdot k_y \cdot n \cdot \Delta y) \right| \quad (9)$$

式中: $k_x = k \sin \theta \cos \phi$; $k_y = k \sin \theta \sin \phi$ 。

4 仿真验证

以 50×50 个半波振子构成的大型阵列天线为例, 建立仿真模型。天线波长 $\lambda = 200 \text{ mm}$ ($f = 1.5 \text{ GHz}$), 阵元间距 0.5λ , 采样间隔 0.45λ , 阵面与探头距离 5λ 。扫描面大小为 $45\lambda \times 45\lambda$ 。假设天线阵元间互耦造成通道间存在 1 dB 的随机误差和 20° 相位随机误差, 仿真过程采用复数矩阵模拟阵元间互耦的影响。 I_m 服从 -30 dB 的泰勒分布, I_n 为均匀分布。

单个阵元信号功率与全部阵元功率之比定义为 S 。为应用旋转矢量法, 要求 $S > -20 \text{ dB}$ ^[11], 该天线阵 $S = -28.6 \text{ dB}$, 需将天线阵面进行分区以完成校准。在每个区域中选取 7×7 个半波振子构成的小型天线阵面为参考阵面, $S = -17.5 \text{ dB}$, 满足要求。

由式(4)计算出阵列天线的理论方向图, 由式(9)计算校准前天线方向图。由于各通道存在幅相误差, 校准前天线方向图恶化明显, 需对天线进行校

准。表 1 为校准前、后天线的副瓣电平,图 3 为低副瓣天线校准前后方向图的对比。由图可知各通道的幅相误差与阵元间互耦对波束指向和波束宽度影响较小,对阵列副瓣电平的影响比较严重。近场扫描法校准低副瓣天线时,未考虑阵元间互耦,校准后天线副瓣电平仍然偏高,需进行二次校准。

表 1 校准前后天线的副瓣电平

Tab. 1 Antenna side-lobe level before and after calibration

天线状态	副瓣电平的 平均值/dB	峰值副瓣 电平/dB
理论远场	-38.27	-30.12
校准前天线远场	-35.31	-28.63
近场扫描法校准后天线	-37.95	-29.48

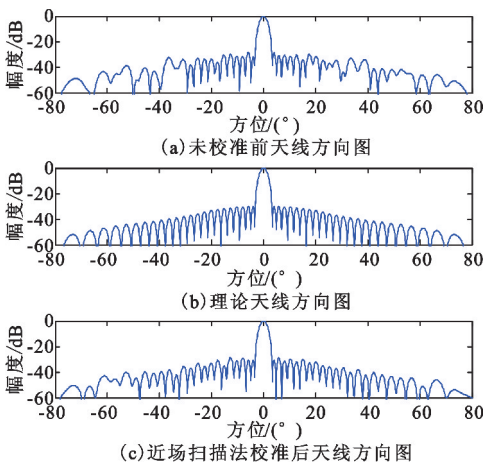


图 3 校准前后天线方向图与理论值的对比
Fig. 3 Antenna patterns before and after calibration

在大阵面的中间区域选取由 7×7 个半波振子构成的小型参考阵面。采用近场扫描法校准阵元的幅度相位,由式(9)计算天线 E 面方向图,副瓣电平 1 为 -12.69 dB ,方向图旁瓣受阵元互耦影响而抬高。采用旋转矢量法进行校准,副瓣电平 2 为 -13.78 dB 。选用本文提出的方法对阵面进行校准,,副瓣电平 3 为 -13.16 dB 。图 4 为 3 种方法校准后天线方向图的对比。本文所提出的方法近似认为区域内所有单元因阵元间互耦产生的幅相误差相同,而实际校准中,各阵元因互耦而产生的幅相误差不完全相同,近似处理不能完全消除误差,因此仅用 REV 法校准精度略高于本文的方法。图 5 为 3 种方法校准后阵面单元相位分布,REV 法校准后相位误差最小,新方法校准后相位约带有 10° 的误差,近场扫描法校准后约带有 20° 的相位误差。图 4 和图 5 验证了此方法的可行性与正确性,说明其优于未考虑互耦影响的近场扫描法。

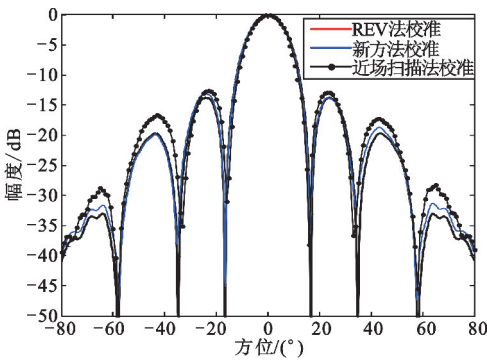


图 4 3 种方法校准后天线方向图的对比
Fig. 4 Antenna patterns after calibration

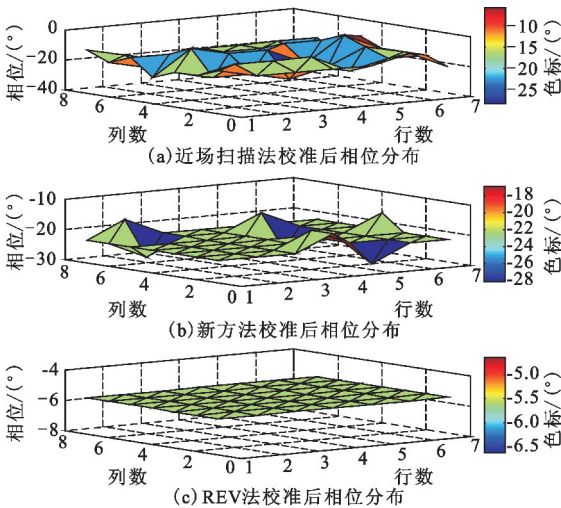


图 5 3 种方法校准后阵面单元相位分布
Fig. 5 Phase distribution of the antenna after calibration

针对 50×50 的天线阵面,先采用近场扫描法对其进行校准并判断阵元是否失效。采用旋转矢量法对中间、边缘区域的参考阵面进行校准,将各区域内阵元的幅相校准到与参考阵面相同,完成大阵面的二次校准。图 6 为采用新方法校准后的天线方向图与理论值的对比,校准后天线的副瓣略有起伏,主瓣与理论值一致,副瓣电平为 -29.95 dB ,副瓣电平平均值为 -38.45 dB ,说明此方法降低了互耦对阵列的影响,优于近场扫描法。

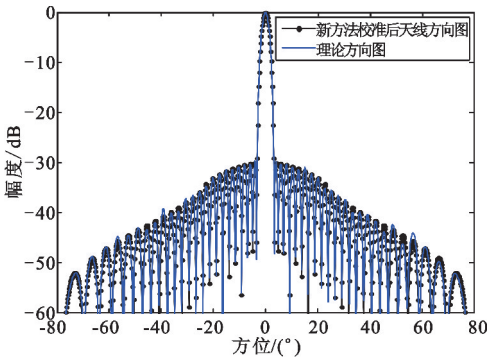


图 6 大型低副瓣天线分区校准后方向图与理论值比较
Fig. 6 The patterns of low side-lobe antenna array after calibration

5 结束语

本文以近场扫描法和旋转矢量法为基础, 采用二次校准来降低阵元间的互耦影响。本方法提高了通道间的幅相一致性, 修正了由天线互耦而产生的误差, 可在近场扫描过程中判断阵元是否失效, 相对准确地校准低副瓣天线与大型阵列天线, 并利用分区校准的方法解决了传统 REV 法无法校准大阵面的问题。由仿真结果可看出, 天线校准结果的精度较高, 优于目前工程上采用的近场扫描法, 可满足实际需要。本文为有源相控阵发射通道的校准提供了一种切实可行的方法, 在后续工作中可进一步研究此方法在接收通道校准中的应用, 并通过外场实验验证本方法。

参考文献:

- [1] 束咸荣, 何炳发, 高铁. 相控阵雷达天线[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 335-342.
SHU Xianrong, HE Bingfa, GAO Tie. Phased array radar antennas[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 335-342. (in Chinese)
- [2] 韦哲, 黄世钊. 相控阵天线测量校准方法分析与比较[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(1): 119-122.
WEI Zhe, HUANG Shizhao. Analysis and comparison of measurement and calibration methods for phased array antennas[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(1): 119-122. (in Chinese)
- [3] 王晓鹏, 赵海明, 张远航, 等. 基于近场测试的相控阵天线自动化校准与阵面监测方法[J]. 微波学报, 2012(8): 229-232.
WANG Xiaopeng, ZHAO Haiming, ZHANG Yuanhang, et al. Auto-calibration and array monitoring of phased array antenna based on near field measurement[J]. Journal of Microwaves, 2012(8): 229-232. (in Chinese)
- [4] 王金元, 高铁. 基于 MCM 法的大型有源相控阵二维阵列校准[J]. 现代雷达, 2008, 30(8): 74-80.
WANG Jinyuan, GAO Tie. MCM-based calibration of large 2-dimensional active phased array[J]. Modern Radar, 2008, 30(8): 74-80. (in Chinese)
- [5] 尚军平, 傅德民, 焦永昌, 等. 基于最佳配相控制的相控阵天线快速测量方法研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 331-334.
SHANG Junping, FU Demin, JIAO Yongchang, et al. A novel method for fast measuring phased array antennas based on optimal phase control[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(2): 331-334. (in Chinese)
- [6] 刘明昱, 冯正和. 分组旋转矢量法校正大规模相控阵天线[J]. 电波科学学报, 2007, 21(3): 380-384.

LIU Minggang, FENG Zhenghe. Combined rotating-element electric-field vector method for calibration of large-scale phased array antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 21(3): 380-384. (in Chinese)

- [7] 阎鲁滨. 相控阵天线幅相校正的简单方法[J]. 航天器工程, 2006(4): 43-45.
YAN Lubin. A simplified method of phased array antenna calibration[J]. Spacecraft Engineering, 2006(4): 43-45. (in Chinese)
- [8] 苏洪涛, 张守宏, 保铮. 发射阵列互耦及幅相误差校正[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(5): 941-944.
SU Hongtao, ZHANG Shouhong, BAO Zheng. Mutual coupling gain and phase error calibration for transmitting array[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(5): 941-944. (in Chinese)
- [9] 田永生. 阵元互耦对小间距天线阵方向图影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
TIAN Yongsheng. Effects of mutual coupling on the pattern of short-space linear arrays[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [10] 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 Yong, OU Jie, XU Ping. Errors analysis of planar near-field antenna measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(11): 987-992. (in Chinese)
- [11] 聂在平. 天线工程手册[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2014: 794-795.
NIE Zaiping. Antenna engineering handbook[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2014: 794-795. (in Chinese)

作者简介:



焦禹(1990—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 2009 年于中南大学获学士学位, 现为南京船舶雷达研究所硕士研究生, 主要研究方向为天线近场测试和校准;

JIAO Yu was born in Harbin, Heilongjiang Province, in 1990. She received the B. S. degree from Central South University in 2009. She is now a graduate student. Her research concerns phased array antenna calibration and measurement.

Email: jiaoyu0918@163.com

陈文俊(1970—), 男, 安徽怀宁人, 博士, 研究员、硕士生导师, 主要研究方向为雷达系统和天线微波技术。

CHEN Wenjun was born in Huaining, Anhui Province, in 1970. He is now a senior engineer of professor with the Ph. D. degree and also the instructor of graduate students. His research concerns radar system and microwave technology and antenna.