

基于生成对抗网络的天线三维方向图室外测量方法

兰天旭¹, 朱秋明¹, 白云鹏¹, 林志鹏¹, 吴启晖¹, 段洪涛², 吕冰²

(1. 南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业与信息化部重点实验室, 南京 211106; 2. 国家无线电监测中心, 北京 100037)

摘要: 天线方向图测量是天线测量的重要内容。针对天线方向图室外测量困难的问题, 提出了一种基于生成对抗网络的天线三维方向图室外测量方案。该方案利用无人机对天线方向图数据进行采集, 对采集的数据进行修正, 获得待测天线和接收天线极化匹配时的直射径数据, 最后利用训练好的生成对抗网络重构出天线的三维方向图。仿真结果表明, 本方案可以高效、高精度地完成天线三维方向图的测量, 具有一定的实用价值。

关键词: 天线方向图; 无人机; 生成对抗网络; 射线追踪; 误差修正

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

An Outdoor Measurement Method for Antenna Three-Dimensional Pattern Based on Generative Adversarial Networks

LAN Tianxu¹, ZHU Qiuming¹, BAI Yunpeng¹, LIN Zhipeng¹, WU Qihui¹, DUAN Hongtao², LYU Bing²

(1. Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China)

Abstract: Antenna pattern measurement is an important part of antenna measurement. Addressing the difficulty of outdoor measurement of antenna pattern, this paper presents an outdoor measurement scheme for antenna three-dimensional pattern based on the generative adversarial network. An unmanned aerial vehicle (UAV) is used to collect the antenna pattern data, modify the collected data, and obtain the direct path data when the receiving antennas match with the polarization of the antenna to be measured. Finally, the three-dimensional pattern of the antenna is reconstructed by using the trained generative adversarial network. Simulation results show that the proposed scheme can complete the measurement of antenna three-dimensional pattern efficiently and accurately, showing practical value.

Key words: antenna pattern; unmanned aerial vehicle (UAV); generative confrontation network; ray tracing; error correction

引言

天线是通信、雷达、遥感和广播等领域应用设备的重要组成。天线应用场景和应用需求的不断增加对天线的设计和性能测试都提出了越来越高的要求。天线方向图是天线的核心指标,直接体现了天线辐射信号的能力,关系到通信或雷达系统的整体工作性能^[1],因此,天线方向图的精确测量是系统设计、优化和评估中极其重要的环节^[2]。

天线方向图测量分为近场测量^[3]和远场测量^[4]。其中,近场测量所需测量距离小,所以受到的外部环境的干扰也小,测量精度比较高,适合进行各种电磁环境分析计算,通过计算可能产生的误差,对其进行补偿。但是,近场测量需要高精度的测量设备,造价高,整个测试过程耗时也比较长^[5]。实际中经常采用远场测量的方法。对于小口径天线,测量距离较短,可以在微波暗室内进行测量;对于口径较大的天线(如短波天线),远场测量需要的空间较大,需要在室外进行测量^[6-7]。目前,在室外进行天线远场测量通常通过搭建测试场来进行,往往需要有高大的建筑物或绝缘塔,场地要求苛刻,建设成本巨大^[8]。

近年来,随着无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)技术的发展,越来越多的学者开始利用无人机在室外进行天线方向图测量。文献[9,10]提出了利用无人机进行天线二维方向图的测量方法。文献[11]提出了一种基于无人机平台的天线三维方向图测量方法,该方法需要的测量数据较多,时间较长。文献[12]利用三角函数作为加权系数,利用少量天线方向图主平面数据得到天线三维方向图,但对于天线高频段方向图效果并不突出。文献[13]提出把天线角度和天线辐射的物理特性相结合对天线三维方向图数据进行重构,可以提高偶极子天线的重构精度,但对方向性天线的重构不能起到比较好的效果。文献[14]提出的加权方法可以提高喇叭天线三维方向图的重构精度,但对其他类型天线重构效果不佳。文献[15]对全辐射模式的正交基函数集的展开系数进行插值,可以利用期望的频率等参数的合理响应,使用很少的训练数据构建插值模型,进一步提高了重构的精度。文献[16]探索了采用神经网络和支持向量机等机器学习方法来重构天线方向图,验证了这种方法在天线方向图重构领域的可行性。然而,由于所采用模型的固有限制,这些方法在学习不同天线方向图时面临一定的挑战。

为了进一步提升方向图重构的精度,提高重构方法对于不同天线的适用性,本文提出了一种基于无人机的天线三维方向图室外测量方案,并利用生成对抗网络(Generative adversarial network, GAN)重构高精度的三维方向图。该方案首先利用无人机采集测量数据,然后利用极化失配修正算法对采集的数据进行修正,并利用射线追踪技术剔除地面反射径的影响,进而得到天线直射径功率,最后利用训练好的GAN和实测数据天线完成三维天线方向图的重构。

1 室外天线方向图测量方案

天线方向图用于描述天线辐射场的相对场强或功率(归一化模值)随方向的变化,是衡量天线性能的重要指标^[17]。通过天线方向图,可以直观地观测到所测量的天线在各个方向的辐射情况^[18]。此外,从天线方向图还可以得到天线的其他性能参数,例如主瓣宽度、旁瓣电平、方向系数和增益等^[19-20]。测量完整的天线三维方向图数据比较复杂,实际通常测量天线最大辐射方向电场矢量所在平面和最大辐射方向的磁场矢量所在平面的方向图数据,即 E 面方向图和 H 面方向图,再通过重构算法获得完整的天线三维方向图。

本文采用固定天线法测量天线远场功率方向图。测量场景如图1所示,待测天线固定不动。由天线的互易性可知,待测天线无论作为接收天线还是发射天线,所得测量结果相同。本文将待测天线作为发射天线,无人机的机载天线作为接收天线。让无人机在天线远场区沿着待测天线的 E 面和 H 面飞行采集数据,最短飞行半径 r_{\min} 可表示为

$$r_{\min} = \max\left(\frac{2D^2}{\lambda}, 10\lambda\right) \quad (1)$$

式中: D 为天线口径, λ 为测试频点的波长。根据无人机续航时间,设置无人机的飞行速度和每个采样点的悬停时间,确保在每个采样点无人机的姿态使得机载定向天线对准被测天线。

无人机执行飞行任务时,接收并记录所在位置姿态和功率数据,并传输给地面设备。地面设备接收并同步各个位置的功率数据和无人机位姿数据,对测量数据进行处理并重构出天线三维方向图。



图1 无人机室外天线三维方向图测量

Fig.1 3D pattern measurement of outdoor antenna of UAV

无人机的接收功率可由弗里斯公式计算^[21]

$$P^r = \left(\frac{c}{4\pi f_c d}\right) P^t G^t G^r \quad (2)$$

实际中,接收功率通常为分贝形式,式(2)可转换为

$$P^r = P^t + G^t + G^r - 10\lg\left(\frac{4\pi f_c d}{c}\right) \quad (3)$$

式中: P^r 为无人机接收到的功率, P^t 为待测天线的发射功率, G^t 为待测天线的发射增益, G^r 为接收增益, c 为光速, f_c 为载波频率, d 为收发天线间的距离。

天线三维方向图为天线远场等距离球面的相对辐射情况,可表示为

$$\bar{P}(\theta, \varphi) = P^r(\theta, \varphi) - \max P^r(\theta, \varphi) \quad (4)$$

式中: θ 为相对于待测天线的俯仰角, φ 为相对于待测天线的方位角, $P^r(\theta, \varphi)$ 为球面该方位的接收功率, $\max P^r(\theta, \varphi)$ 为球面接收功率的最大值, $\bar{P}(\theta, \varphi)$ 为天线在该位置的方向图数据。

2 测量数据误差修正及方向图重构

2.1 基于无人机的测量系统

本文基于无人机的天线方向图测量系统如图2所示,由空中和地面两部分组成。其中,空中部分包括无人机、频谱接收机和机载天线。无人机采用旋翼无人机,其飞行平稳,可以减少无人机姿态对测量结果和无人机携带的频谱接收机的影响^[22]。无人机可以根据预设轨迹自主飞行,并接收执行测量任务中各时刻的全球定位系统(Global positioning system, GPS)定位的位置。由于飞行半径较远且周围可能存在其他干扰源,机载天线选择用定向天线来获取待测天线更强的信号。此外,由于机载天线会受到机体的影响,需要在微波暗室对机载天线方向图进行准确建模以提高测量精度。频谱接收机实时接收信号,并和无人机GPS位置同步后传输给地面。地面部分由数据传输天线、数据处理终端组成。数据传输天线负责向无人机传输控制指令,并接收无人机回传的测量数据;数据处理终端负责记录、修正

测量数据,并最终重构天线的三维方向图。

天线方向图的测量精度受GPS定位误差的影响很大。仅仅采用GPS定位会存在多种误差,比如,GPS信号发射时间是以卫星时钟为基准,信号接收时间以接收机时钟为基准。所以定位精度存在时钟偏移。同时,信号传播过程中也存在多种误差。伪距观测方程为

$$X_{ui}(t) = \rho_{ui}(t) + c[\delta X_u(t) - \delta X_i(t)] + I_{ui}(t) + M_{ui}(t) + \epsilon_P \quad (5)$$

式中: $\rho_{ui}(t)$ 表示GPS接收机与定位卫星间的实际空间距离, $\delta X_u(t)$ 和 $\delta X_i(t)$ 分别表示接收机和卫星的时钟偏移, $I_{ui}(t)$ 为电离层延迟, $M_{ui}(t)$ 为对流层延迟, ϵ_P 为测量噪声, t 为观测历元。本文采用实时动态定位(Real-time kinematic, RTK)技术提高定位精度,以地面端作为基准站,以RTK无人机端作为流动站,通过计算多个卫星与RTK无人机端和地面端之间的相对距离,排除大气扰动、相对论误差和时钟偏移等因素影响,得到更接近真实距离的校准结果,精度可达厘米级^[23]。

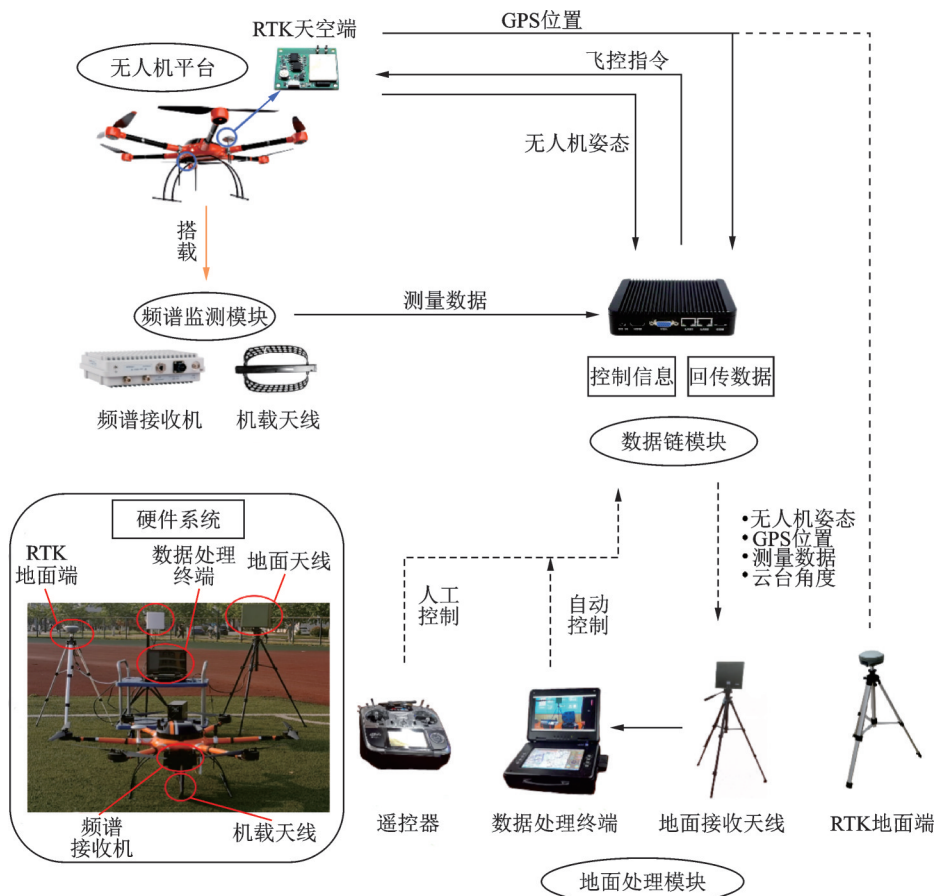


图2 天线方向图测量系统

Fig.2 Antenna pattern measurement system

2.2 天线测量数据误差修正方法

在室外测试过程中获得的测量数据与在微波暗室中测量数据相比,误差主要源于以下几个因素:(1)无人机携带的定向天线需要时刻对准待测天线,而无人机姿态的不稳定会导致收发天线间

的极化失配;(2)接收到的地面反射径干扰信号会影响测量结果^[24]。

理想情况下辐射功率值是在发射和接收天线极化匹配的情况下采集的,但是机载接收天线实际采集数据与极化匹配的采集数据之间存在偏差,需要进行极化失配修正^[25]。机载天线实际收到的功率可表示为

$$P^r = \left(\frac{c}{4\pi f_c d} \right) P^t G^t G^r v \quad (6)$$

式中: v 为发射天线与接收天线之间的极化匹配因子,表示实际接收到的功率与极化匹配时应该接收到的功率间的比值,可表示为

$$v = \left| \hat{\mathbf{e}}_T \cdot \hat{\mathbf{e}}_R^* \right|^2 \quad (7)$$

式中: $\hat{\mathbf{e}}_R$ 和 $\hat{\mathbf{e}}_T$ 分别为收、发天线的电场复单位矢量,“*”表示复矢量的共轭,在极化匹配时, $v=1$ 。

以无人机位置(X_o, Y_o, Z_o)为原点建立三维直角坐标系。设无人机定向接收天线指向 x 轴正方向时,机载天线与待测天线极化方式相同,无人机的姿态角包括偏航角、滚转角和俯仰角,无人机飞行时会实时记录所处位置的姿态角信息并反馈给地面终端, $D = [\theta_i^{ML}, \varphi_i^{ML}]$ 为无人机在该采样点处定向天线的波束接收方向。偏航角为实际航向与计划航向之间的夹角,俯仰角为机体轴与地平面之间的夹角,滚转角为无人机绕其前后轴线转动的角。则有

$$v = \left(\frac{\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{n}_R}{|\mathbf{n}_T| |\mathbf{n}_R|} \right)^2 \quad (8)$$

$$\mathbf{n}_R = \mathbf{a}'_R \times \mathbf{D} \quad \mathbf{n}_T = \mathbf{a}_T \times \mathbf{D} \quad (9)$$

$$\mathbf{a}'_R = T_{\text{roll}} T_{\text{yaw}} T_{\text{pitch}} \mathbf{a}_R \quad (10)$$

式中: \mathbf{a}_R 和 \mathbf{a}_T 分别为收、发天线的轴线方向, T_{roll} 、 T_{yaw} 和 T_{pitch} 分别为滚转角、俯仰角和偏航角的旋转矩阵,可分别表示为

$$T_{\text{roll}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \theta_i^{ML}\right) & -\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \theta_i^{ML}\right) \\ 0 & \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \theta_i^{ML}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \theta_i^{ML}\right) \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$T_{\text{yaw}} = \begin{pmatrix} \cos(\tau + \varphi_i^{ML}) & -\sin(\tau + \varphi_i^{ML}) & 0 \\ \sin(\tau + \varphi_i^{ML}) & \cos(\tau + \varphi_i^{ML}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$T_{\text{pitch}} = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \quad (13)$$

理想的天线方向图测量数据仅仅包含直射径信号,而接收数据为多径传播的信号,可以利用射线追踪(Ray tracing, RT)技术进行剔除。RT技术在信道建模与分析领域一直发挥着重要的作用。随着毫米波以及更高频段无线通信技术的发展,RT技术因其更适应于频率更高的场景被更加广泛地应用。RT技术通过对射线进行追踪来寻找出多径无线信道中发射点到接收点间所有可能的传播路径,包括直射径、反射径以及绕射径等,从而计算出接收点的无线电参数,包括电场强度、振幅、相位以及接收信

号强度等^[25]。因此,可以利用RT技术剔除掉反射径和绕射径,获得更准确的天线方向图数据^[26]。

由于测量场景一般比较空旷,故不考虑绕射场存在,可近似看作图3双径空地传播模型^[27]。对于反射场,其垂直极化波反射系数 R_{\perp} 和水平极化波的反射系数 R_{\parallel} 可分别表示为

$$R_{\perp} = \frac{\cos \theta_2 - \sqrt{\epsilon\mu - \sin^2 \theta_2}}{\cos \theta_2 + \sqrt{\epsilon\mu - \sin^2 \theta_2}} \quad (14)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\epsilon \cos \theta_2 - \sqrt{\epsilon\mu - \sin^2 \theta_2}}{\epsilon \cos \theta_2 + \sqrt{\epsilon\mu - \sin^2 \theta_2}} \quad (15)$$

$$\epsilon = \epsilon_r - j60\lambda\sigma \quad (16)$$

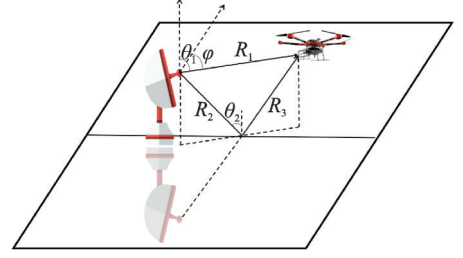


图3 双径传播模型

Fig.3 Two-path propagation model

式中: θ_2 为相对于地面法线的入射角, ϵ_r 和 μ 分别为环境的相对介电常数和相对渗透率, σ 为环境电导率。无人机接收到的电场由直接路径电场和地面反射路径电场组成。接收到的电场可以表示为

$$\mathbf{E}_R = \mathbf{E}_{\text{LOS}} + \mathbf{E}_{\text{Ref}} \quad (17)$$

式中: \mathbf{E}_R 为接收信号, \mathbf{E}_{LOS} 为直射径信号, \mathbf{E}_{Ref} 为地面反射径信号。直射径信号可表示为

$$\mathbf{E}_{\text{LOS}} = \sqrt{\frac{P_T G_T(f, \theta_1, \varphi) G_R(f, \theta_1, \varphi) \eta_0}{2\pi}} \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} \quad (18)$$

式中: η_0 为自由空间特征阻抗, $G_T(f, \theta_1, \varphi)$ 为发射天线方向增益, $G_R(f, \theta_1, \varphi)$ 为接收天线的方向增益。

天线的反射径信号可以表示为

$$\mathbf{E}_{\text{Ref}} = \sqrt{\frac{P_T G_T(f, \pi - \theta_2, \varphi) G_R(\theta_1 - \theta_2) \eta_0}{2\pi}} R \frac{e^{-jk(R_2 + R_3)}}{R_2 + R_3} \quad (19)$$

式中: R 为地面对发射极化波的反射系数。用于之后的数据修正的直射功率因子 ω 满足

$$\omega = \frac{|\mathbf{E}_{\text{LOS}}|^2}{|\mathbf{E}_{\text{Ref}}|^2} \quad (20)$$

则实际用于方向图重构的功率数据 \bar{P}^r 可表示为

$$\bar{P}^r = \frac{\omega P^r}{v(1 + \omega)} \quad (21)$$

2.3 基于生成对抗网络的三维方向图重构算法

GAN由生成器网络与鉴别器网络两部分组成。生成器通过学习真实数据的分布情况形成可以以假乱真的数据,即从真实数据中获得训练数据。鉴别器通常是一个二元分类器,目的是尽可能准确地区分生成器生成的数据与真实的数据。GAN的优化问题是一个最大最小优化问题,优化终止于一个鞍点,即该点相对于生成器网络是最小值但相对于鉴别器网络是最大值。若GAN的生成器已经学习到了真实数据的真实分布,并基于此分布生成训练数据,则优化达到了纳什均衡^[28]。

生成器和鉴别器模型均为神经网络模型,生成器输入的噪声变量的先验分布记为 P_z ,其中 z 为噪声变量。生成器网络 $G(z, \theta_g)$ 表示了从噪声空间到真实数据空间的映射, $G(z, \theta_g)$ 是一个由参数 θ_g 表示的可微函数,鉴别器网络 $D(x, \theta_d)$ 的输出为概率值,表示 x 是真实数据而不是生成器生成数据的概率,其中 x 为真实数据集,鉴别器网络由参数为 θ_d 的神经网络表示^[29]。训练 $D(x, \theta_d)$ 使鉴别概率最大化,同时训练 $G(z, \theta_g)$ 使得 $\log_2(1 - D(G(z)))$ 最小化。有关最原始的最大最小博弈,目标函数为

$$\min_{\theta_g} \max_{\theta_d} V(D, G) = E_{x \sim p_{\text{data}}(x)} [\log_2 D(x, \theta_d)] + E_{z \sim p_z(z)} [\log_2 (1 - D(G(z, \theta_g)))] \quad (22)$$

由于无人机获取的天线辐射功率数据量比较少,在面向三维补全的GAN训练阶段的有效数据极少,在形态上为一行和一部分的数据。本文基于GAN的天线三维方向图算法重构算法由两个阶段组成,分别是离线训练阶段和在线部署阶段,如图4所示。在离线训练阶段,以完整天线方向图数据作为训练数据对所设计的GAN迭代训练。对于在线部署阶段,将已训练至收敛的生成器网络部署于实际应用,直接根据测量数据对实际缺损三维方向图数据进行精确补全。

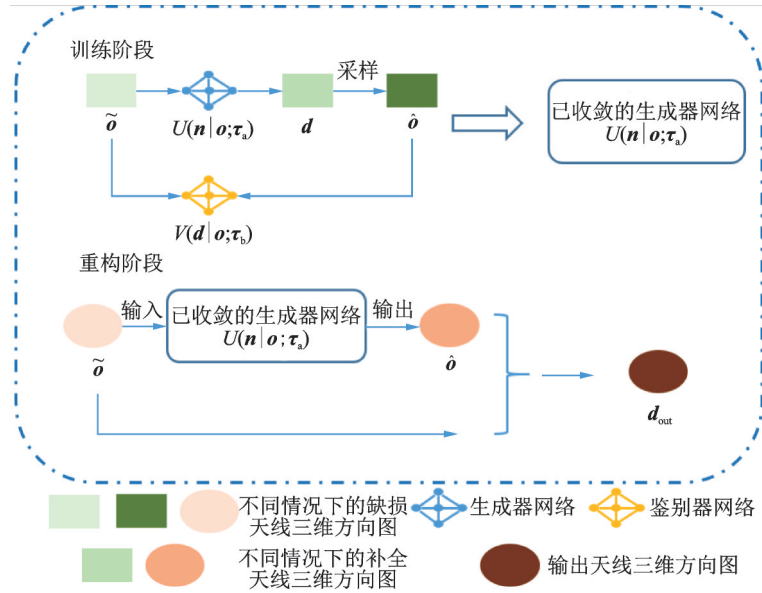


图4 基于GAN的天线三维方向图重构流程

Fig.4 Reconstruction process of antenna 3D pattern based on GAN

训练的生成器网络记为 $U(n|o; \tau_a)$, 鉴别器网络记为 $V(d|o; \tau_b)$, 其中 n 为服从标准高斯分布 $p_n(n)$ 的随机变量, o 为用于训练的分布为 $p_{\text{data}}(o)$ 的离散方向图数据, d 为网络 $U(n|o; \tau_a)$ 的输出或用于训练的分布为 $p_{\text{data}}(d)$ 的连续方向图数据, 而 τ_a 和 τ_b 为各自对应网络的待优化参数。具体而言, 这两个深度神经网络的训练目标为优化 τ_a 和 τ_b , 以满足

$$\min_{\theta_a} \max_{\theta_b} S(U, V) = E_{d \sim p_{\text{data}}(d)} [V(d|o; \tau_b)] - E_{n \sim p_n(n)} [V(U(n|o; \tau_a)|o; \tau_b)] + E_{o \sim p_{\text{data}}(o)} [W_o \odot o - W_o \odot F(U(n|o; \tau_a))] \quad (23)$$

式中: $S(U, V)$ 为神经网络训练时的代价函数, “ \odot ” 为 Hadamard 积, $F(\cdot)$ 为根据离散方向图数据采样情况对网络 $U(n|o; \tau_a)$ 输出进行相同采样的采样函数, 而权重 W_o 的第 i 个元素为

$$W_o(i) = \omega_1 o(i) + \omega_2 \frac{d_{i,i+1} + d_{i,i-1}}{2 \sum d_{i,j}} \quad (24)$$

式中: $d_{i,j}$ 为第 i 个采样位置和第 j 个采样位置间的距离, ω_1 和 ω_2 分别为各自部分的权重。待网络 $U(n|o; \tau_a)$ 和 $V(d|o; \tau_b)$ 若干次迭代训练后, 可使用此时的网络 $U(n|o; \tau_a)$ 对修正后的离散方向图数

据进行内插补全,生成天线三维方向图。

为了提高精度对辐射功率数据进行归一化处理,将归一化的功率数据进行“着色”,即将其变为红绿蓝(Red green blue, RGB)模式数据,将其扩展为三通道,对于设计的生成对抗网络,网络结构的超参数设置定义为 $h=(k, s_c, p_c, d_c)$,其中 $k \times k$ 为卷积核尺寸, s_c 为卷积核滑动步长, p_c 为补零层数, d_c 为空洞率,特征图通道数即为 F ,每层均使用线性整流函数作为激活函数。其结构如图 5 所示。

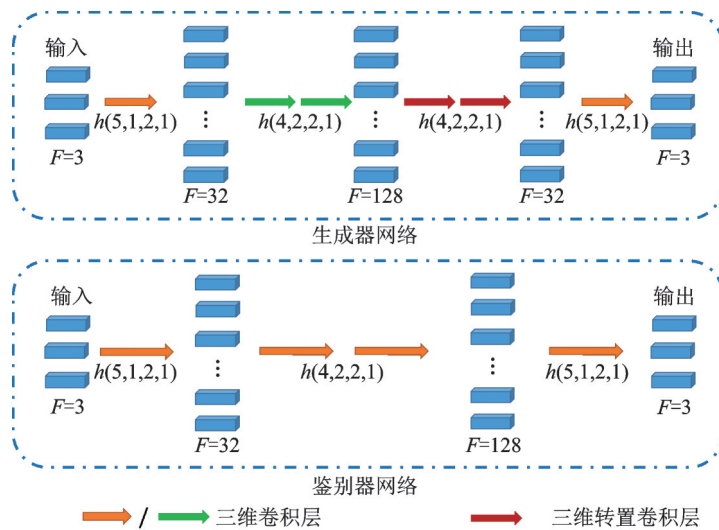


图 5 GAN 结构图

Fig.5 GAN structure diagram

在训练 GAN 的过程中,为使模型在训练过程中既不会过拟合也不会欠拟合,并使其精度尽可能高,需要调整模型的容量与实际问题相匹配,这即是最佳容量问题^[30]。模型的深度和训练的迭代次数与任务的复杂度相关。比如,训练轮次过少,GAN 模型参数更新次数较少,模型自然偏向欠拟合,即没有学习到数据的所有特征;而迭代次数过多时,模型则会偏向过拟合,即学习到了训练数据的太多特征,而这些特征不一定适用于测试数据以及真实数据。因此,最优迭代次数是最佳容量的一部分。此外,还可以调整模型的复杂度,即网络的深度与每一层的维度。也可以使用一些算法来丢弃一些数据,来降低模型的复杂度,例如舍弃法和早停法。还可以使用集成学习等方法使网络小型化。

3 数值仿真与实测验证

针对本文提出的算法,根据对偶极子天线 100 MHz 和喇叭天线 2 GHz 在空旷外场环境下的情况进行了仿真验证。基于 MATLAB 平台生成天线方向图的理论数据,利用 Wireless insite 软件和天线方向图的理论数据生成在室外实际测量中接收功率数据。天线其他参数设置如下:天线口径为 3 m,发射功率为 40 dBm。生成最小飞行半径处的功率数据,并在 E 面和 H 面上每 5° 为一个采样点。本文对比了数据修正前后进行计算的差别,以及数据修正后通过 GAN 进行计算与通过传统算法进行计算的差别。传统算法为最经典的模拟退火(Simulated annealing, SA)算法。天线方向图任意点的数据为其对应点上已知的 E 面和 H 面数据相加。

偶极子天线的仿真结果如图 6 所示。图 6(a)为天线理论三维方向图,图 6(b,c)为天线 E 面和 H 面方向图理论值、实际接收值和修正后数值的对比情况,图 6(d)为不经过数据修正、利用 GAN 的天线三

维方向图重构情况,图6(e)为经过数据修正后利用SA算法的重构情况,图6(f)为经过数据修正后利用GAN的天线三维方向图重构情况。可以看出,图6(f)和理论值最相近。

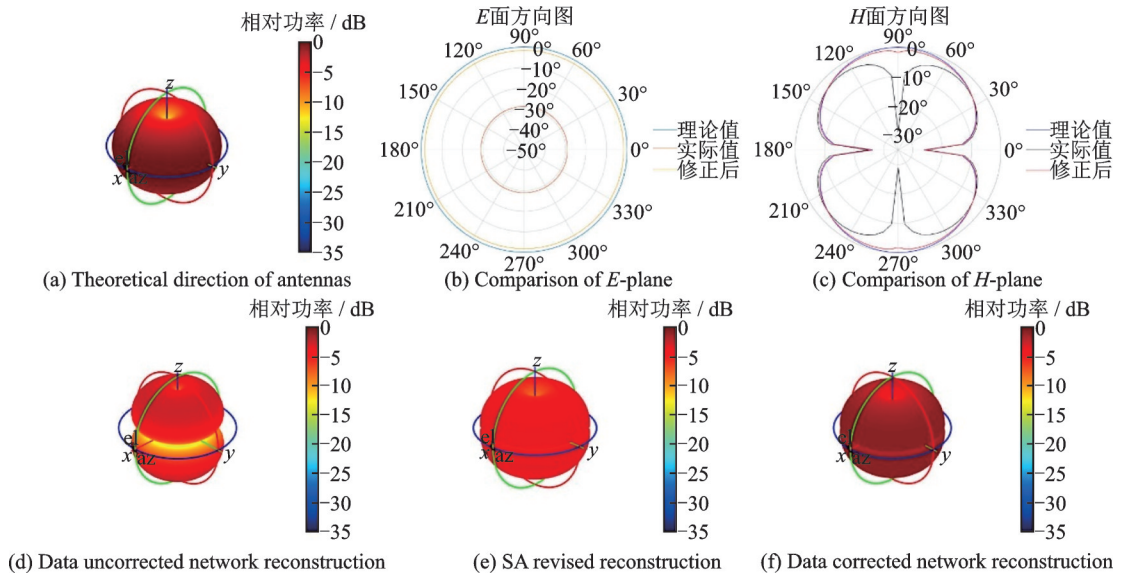


图6 偶极子天线仿真结果

Fig.6 Dipole antenna simulation results

喇叭天线仿真结果如图7所示。图7(a)为天线理论三维方向图,图7(b,c)为天线*E*面和*H*面方向图理论值、实际接收值和修正后数值的对比情况,图7(d)为不经过数据修正、利用GAN的天线三维方向图重构情况,图7(e)为经过数据修正后利用SA算法的重构情况,图7(f)为经过数据修正后利用GAN的天线三维方向图重构情况。可以看出,图7(f)和理论值最相近。

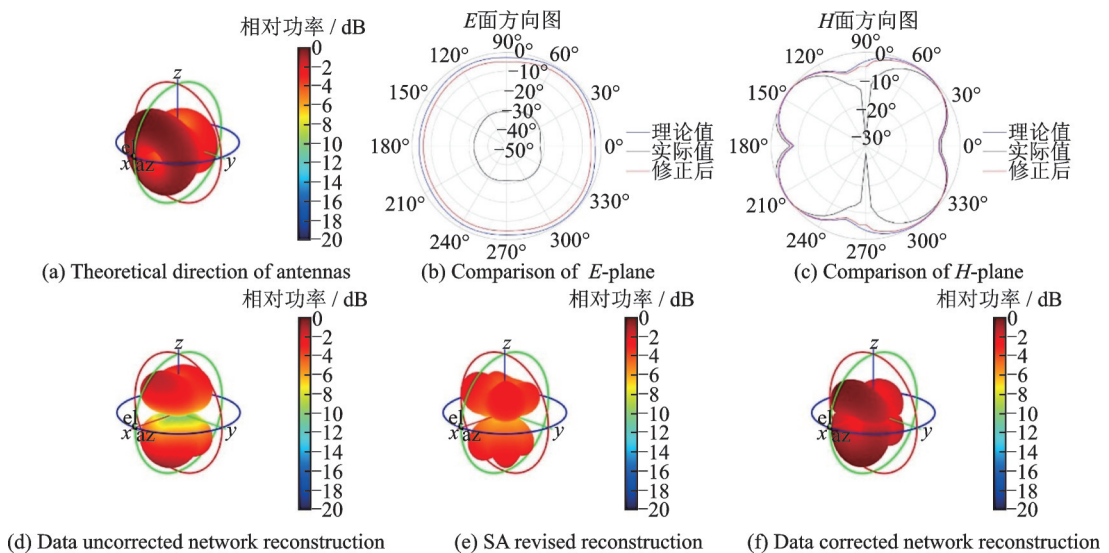


图7 喇叭天线仿真结果

Fig.7 Horn antenna simulation results

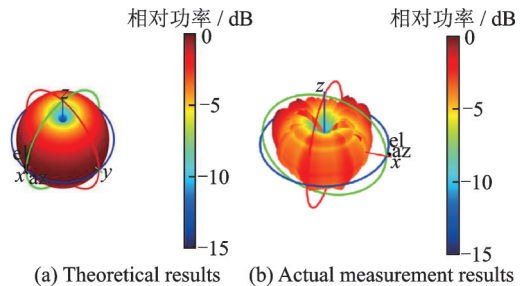
通过仿真数据可以看出,不管是全向天线还是方向性天线,利用本文提出的修正方法和训练的GAN,均可以提升重构精度。

本文利用设计的天线三维方向图室外测量方法在天线测试场进行了实测验证。待测天线为偶极子天线,测量了该天线 100 MHz 的天线方向图,测量场景如图 8 所示。理论结果如图 9(a)所示,实测结果如图 9(b)所示。可以看出,测量结果趋势与理论基本符合,但由于天线安装等因素对其方向图参数造成的影响,使得测量结果与理论值不完全相同。



图8 天线测试场场景

Fig.8 Antenna test field scene



(a) Theoretical results (b) Actual measurement results

图9 理论与实测结果对比

Fig.9 Comparison of theoretical and actual measurement results

4 结束语

针对天线三维方向图室外测量问题,提出了一种基于GAN的三维天线方向图测量方法。首先阐述了测量系统的整体构成和测量方案,利用无人机采集测量数据,并从天线极化和多径传播两方面对测量数据进行了相关修正,利用训练的GAN以及修正数据重构三维天线方向图,并通过仿真对比本方案和传统算法的重构精度,最后在实测场景对本方法进行了验证。在未来的工作中,将优化数据修正方法和三维天线方向图重构算法。

参考文献:

- [1] NÚEZ J, ORGEIRA-CRESPO P, ULLOA C, et al. Analysis of the operating conditions for UAV-based on-board antenna radiation pattern measurement systems[J]. PLoS ONE, 2021, 16(2): e0245004.
- [2] KARIM M R, YANG X, SHAFIQUE M F. On chip antenna measurement: A survey of challenges and recent trends[J]. IEEE Access, 2018, 6: 20320-20333.
- [3] NEITZ O, MAUERMAYER R A M, WEITSCH Y, et al. A propagating plane-wave-based near-field transmission equation for antenna gain determination from irregular measurement samples[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(8): 4230-4238.
- [4] LI X, WEI G, YANG L, et al. Fast determination of single-cut far-field pattern of base station antenna at a quasi-far-field distance[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(5): 3989-3996.
- [5] DIAKITE C, LANTERI J, MIGLIACCIO C. An outdoor measurement technique for large structures antennas[C]// Proceedings of 2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). [S.l.]: IEEE, 2017: 16-19.
- [6] WU L, WANG C, PENG S, et al. 3-D printed wideband millimeter-wave horn antenna with conical radiation pattern[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(3): 453-456.
- [7] COMMITTEE A S .IEEE standard test procedures for antennas[J].Electronics and Power, 1980, 26(9): 749.
- [8] KREMER D, MORRIS A, BLAKE R, et al. Outdoor far-field antenna measurement system for testing of large vehicles[C]//

- Proceedings of European Conference on Antennas & Propagation. [S.l.]: IEEE, 2013.
- [9] PAONESSA F, VIRONE G, CIORBA L, et al. Design and verification of a Q-band test Source for UAV-based radiation pattern measurements[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(12): 9366-9370.
- [10] UMEYAMA A Y, SALAZAR-CERRENO J L, FULTON C J. UAV-based far-field antenna pattern measurement method for polarimetric weather radars: Simulation and error analysis[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 191124-191137.
- [11] FERNANDEZ M G, LOPEZ Y A, ARBOLEYA A, et al. Antenna diagnostics and characterization using unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Access*, 2017, 5(99): 23563-23575.
- [12] PETRITA T, IGNEA A. A new method for interpolation of 3D antenna pattern from 2D plane patterns[C]//Proceedings of International Symposium on Electronics & Telecommunications. [S.l.]: IEEE, 2013.
- [13] VASILIADIS T G, DIMITRIOU A G, SERGIADIS G D. A novel technique for the approximation of 3-D antenna radiation patterns[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2005, 53(7): 2212-2219.
- [14] LEONOR N R, CALDEIRINHA R, SÁNCHEZ M G, et al. A three-dimensional directive antenna pattern interpolation method[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2016, 15(N/A): 881-884.
- [15] SARKER N, PODDER P, RUBAIYAT HOSSAIN MONDAL M, et al. Applications of machine learning and deep learning in antenna design, optimization, and selection: A Review[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 103890-103915.
- [16] DE VILLIERS D I L. A comparison of full pattern and response feature based modeling of antenna radiation patterns[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). [S.l.]: IEEE, 2017.
- [17] QU X, SHI Z, FANG G, et al. Semi-airborne model for radiation from large grounded wire antenna[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1800-1803.
- [18] ZHAO K, ZHANG S, HO Z, et al. Spherical coverage characterization of 5G millimeter wave user equipment with 3GPP specifications[J]. *IEEE Access*, 2018, 7: 4442-4452.
- [19] CHANDRASEKAR V, KEELER R J. Antenna pattern analysis and measurements for multiparameter radars[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2009, 10(5): 674-683.
- [20] WILLIAMS J T, DELGADO H J, LONG S A. An antenna pattern measurement technique for eliminating the fields scattered from a finite ground plane[C]//Proceedings of 1990 Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics. [S.l.]: IEEE, 2017.
- [21] NIAMIEN M A C, COLLARDEY S, MAHDJOUBI K, A hybrid approach for receiving antennas: Concepts and applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(11): 5462-5473.
- [22] ZHU Q, ZHAO Y, HUANG Y, et al. DEMO abstract: An UAV-based 3D spectrum real-time mapping system[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2022—IEEE Conference on Computer Communications Workshops. [S.l.]: IEEE, 2022: 1-2.
- [23] 双巧玲. 基于无人机平台的天线测量系统设计与实验研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.
SHUANG Qiaoling. Design and experimental research of antenna measurement system based on an UAV[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2019.
- [24] 朱秋明, 倪浩然, 华博宇, 等. 无人机毫米波信道测量与建模研究综述[J]. *移动通信*, 2022, 46(12): 2-11.
ZHU Qiuming, NI Haoran, HUA Boyu, et al. A survey of UAV millimeter-wave channel measurement and modeling[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(12): 2-11.
- [25] 张建华, 周晓辉, 蒋鹏. 机载天线极化失配及方向性的分析计算[J]. *电波科学学报*, 2007(3): 497-501.
ZHANG Jianhua, ZHOU Xiaohui, JIANG Peng. Analysis of polarization mismatching and radiation pattern of aircraft antenna [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007(3): 497-501.
- [26] ZHU Q, MAO K, SONG M, et al. Map-based channel modeling and generation for U2V mmWave communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(8): 8004-8015.
- [27] ZHU Q, YAO M, BAI F, et al. A general altitude-dependent path loss model for UAV-to-ground millimeter-wave communications[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(6): 767-776.

- [28] GULRAJANI I, AHMED F, ARJOVSKY M, et al. Improved training of Wasserstein GANs[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. [S.l.]: [s.n.], 2017: 5769-5779.
- [29] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on imagenet classification [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. [S.l.]: IEEE, 2015: 1026-1034.
- [30] GOODFELLOW I, BENGIO Y, COURVILLE A, et al. Deep learning[M]. Cambridge: MIT Press, 2016.

作者简介:



兰天旭(1997-),男,硕士研究生,研究方向:电磁频谱地图测绘, E-mail: lantianxu@nuaa.edu.cn。



朱秋明(1979-),通信作者,男,教授,研究方向:信道测量与建模、无人机通信, E-mail: zhuqiuming@nuaa.edu.cn。



白云鹏(1998-),男,硕士研究生,研究方向:无人机航迹规划, E-mail: baiyunpeng@nuaa.edu.cn。



林志鹏(1991-),男,副研究员,研究方向:信号处理、无人机通信, E-mail: linlzp@nuaa.edu.cn。



吴启晖(1970-),教授,博士生导师,研究方向:认知信息论、电磁空间频谱智能管控、天地一体化信息网络和无人机集群智能通信, E-mail: wuqihui@nuaa.edu.cn。



段洪涛(1978-),男,高级工程师,研究方向:无线电管理技术, E-mail: duanhnt@srcc.org.cn。



吕冰(1989-),男,工程师,研究方向:无线电管理技术领域, E-mail: llvbing@srcc.org.cn。

(编辑:陈珺)