

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209477

基于单辅助源校正的 MUSIC 测向性能 分析与实验验证

郝崇宇^{1,2} 施伟² 王保卫¹

(1.南京信息工程大学计算机与软件学院 南京 210044; 2.国防科技大学第六十三研究所 南京 210007)

摘要: 实际测向系统中,由于多通道微波组件、天线阵元及连接电缆等射频部件传输特性不一致的影响,使得接收通道失配问题不可避免。存在通道失配时,天线阵列的接收数据中含有幅度和相位误差,最终导致空间谱的波达方向(DOA)估计性能急剧下降甚至失效。本文针对这一问题,采用一种基于单辅助信源的通道校正算法,研究了该算法在通道数据预补偿和导向矢量修正的具体应用方法,并结合多信号分类算法(MUSIC)进行DOA估计。从信噪比、快拍数和均方根误差等仿真参数证实了校正算法的有效性,并利用硬件平台的实测数据,验证了校正算法能够对通道失配进行有效补偿并获得较高的DOA估计性能。

关键词: 波达方向估计;幅相误差;单辅助源;空间谱测向

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4020

Analysis and experimental verification of MUSIC direction finding based on single auxiliary source correction algorithm

Hao Chongyu^{1,2} Shi Wei² Wang Baowei¹

(1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. The 63rd Research Institute of National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: In the actual direction finding system, due to the inconsistency of the transmission characteristics of the radio frequency parts such as multi-channel microwave components, antenna elements and connecting cables, the mismatch of the receiving channels is inevitable. When there is channel mismatch, the received data of the antenna array contains amplitude and phase errors, which eventually lead to a sharp decline or even failure of the estimation performance of the direction of arrival (DOA) of the spatial spectrum. Aiming at this problem, a channel correction algorithm based on a single auxiliary source is used to study the application of this algorithm in channel data pre-compensation and steering vector correction, and combines the multiple signal classification algorithm (MUSIC) for DOA estimation. The effectiveness of the correction algorithm is verified by the simulation parameters such as signal-to-noise ratio, number of snapshots and root mean square error. The measured data of the hardware platform is used to verify that the correction algorithm can effectively compensate for channel mismatch and obtain high DOA estimation performance.

Keywords: direction of arrival; amplitude and phase error; signal auxiliary source; spatial spectrum direction finding

0 引言

空间谱估计技术是阵列信号处理的主要研究方向之一,其应用涉及雷达、声纳、地震等众多领域^[1-2],其研究的主要内容是估计待测信号的来波方向,信源方位估计也称为波达估计^[3-4]。几乎所有的波达估计算法都是建立在无误差的理想环境下,而在实际测向时,加工工艺水平以及实验周围复杂环境都有可能引起各种误差(例如阵元间的

互耦^[5]、阵元之间幅度/相位误差^[6-7]等),导致实际阵列流形出现一定的偏差或扰动,使现有多信号分类^[8-9],旋转不变子空间^[10](estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, ESPRIT)和最大似然^[11](maximum likelihood, ML)等算法的测向性能恶化。因此,阵列误差校正工作显得尤为重要。

阵列误差对空间谱估计性能的影响引起了国内外学者的广泛关注,并进行了深入研究^[12-17]。文献[12]采用相位

方向函数和阵列天线相位中心算法,分析了幅相误差对阵列天线相位中心的影响。文献[13]通过幅相误差的均方根计算公式,揭示了幅相误差对天线副瓣电平、增益和波束指向的影响。文献[14]通过对阵列接收信号稀疏处理后,将阵列误差自校正算法转化为来波方向和阵列误差最优值问题,通过交替迭代求得两者的最优解,最终实现 DOA 和阵列误差的联合估计,该算法需要较大的运算量。与文献[14]原理相同,文献[15]将四维谱峰搜索降至与方位角和俯仰角相关的二维搜索,利用搜索结果直接计算出最优参数,完成对幅相误差的估计。以上均属于自校正类算法,通常利用优化方法联合估计方位和阵列误差,但是需要求解多维优化问题,运算量较大。实际应用中,有源校正类算法借助空间中已知方位角的校正源对阵列误差进行估计,运算量小、容易获得较高的误差参数估计精度。文献[16]提出一种利用两个标定源在未知方向上估计传感器幅相误差的标定算法,该算法无需对标定源进行精确的方向测量,但是该算法不适用于线阵,并且二维搜索也增加了计算复杂度。文献[17]利用多个不同方位的近场信号源分时工作,通过变换阵列导向矢量,实现了对阵元位置误差和幅相误差的级联估计;此方法利用多个辅助源,这无疑带来了更多的误差并且也增加了算法的运算量。

针对上述问题,本文采用单辅助信源的通道校正算法,仅需外置一个校正源即可估算通道幅相误差。该通道幅相误差包括天线阵元互耦、微波多通道组件幅相不一致和传输电缆相位不一致的因素,校正过程中无需多维搜索,计算量少。将估算获得的通道幅相误差应用于通道数据预补偿和谱峰搜索阶段的导向矢量修正,在辅助信源角度、待测信源角度以及幅相误差随机产生的仿真实验中,测向性能明显提升。外场实验也验证了上述校正算法的有效性。

1 信号模型

本文采用的接收单元由等距均匀线阵构成,如图 1 所示,阵元数为 N ,间距为 d ;发射单元由 $M(M < N)$ 个远场窄带独立信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$ 从 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M$ 入射到此系统。

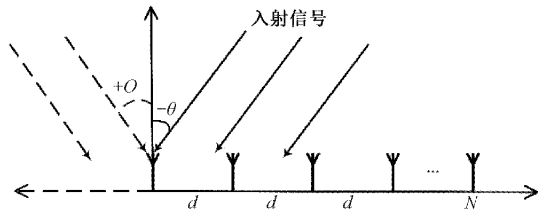


图 1 等距均匀线阵

将第 $i(i=1, 2, \dots, M)$ 个人射信号用复包络形式表示:

$$\begin{cases} s_i(t) = u_i(t) e^{j(\omega_0 t + \varphi_i(t))} \\ s_i(t - \tau) = u_i(t - \tau) e^{j(\omega_0(t - \tau) + \varphi_i(t - \tau))} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_i(t)$ 和 $\varphi_i(t)$ 表示第 i 个信号的幅度和相位, τ 为相

邻阵元接收入射信号的时延, ω_0 表示该入射信号的角频率。上文已假设入射信号为远场窄带独立信号,所以:

$$\begin{cases} u_i(t - \tau) \approx u_i(t) \\ \varphi_i(t - \tau) \approx \varphi_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得:

$$s_i(t - \tau) \approx s_i(t) e^{-j\omega_0 \tau} \quad (3)$$

假设以第一个阵元为参考阵元,那么第 $m(m=1, 2, \dots, N)$ 个阵元接受的信号为:

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^M g_{mi} s_i(t - \tau_{mi}) + n_m(t) \quad (4)$$

$$\tau_{mi} = \frac{(m-1)d \sin \theta_i}{c} \quad (5)$$

式中: g_{mi} 是第 m 个阵元对信号 s_i 的增益; τ_{mi} 为信号 s_i 到达参考阵元与阵元 m 的时间差; $n_m(t)$ 表示 t 时刻阵元 m 接收到的噪声。

则整个天线阵列接收到的数据形式表示如下:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} e^{-j\omega_0 \tau_{11}} & g_{12} e^{-j\omega_0 \tau_{12}} & \cdots & g_{1M} e^{-j\omega_0 \tau_{1M}} \\ g_{21} e^{j\omega_0 \tau_{21}} & g_{22} e^{j\omega_0 \tau_{22}} & \cdots & g_{2M} e^{j\omega_0 \tau_{2M}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N1} e^{j\omega_0 \tau_{N1}} & g_{N2} e^{j\omega_0 \tau_{N2}} & \cdots & g_{NM} e^{j\omega_0 \tau_{NM}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_M(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_N(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

若不考虑每个阵元间的互耦效应、通道失配等误差因素,可将式(6)简化为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A} \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ 表示阵列单元接收的数据矢量; $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$ 表示信号矢量; $\mathbf{N}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$ 表示噪声矢量; $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1(\omega_0), \mathbf{a}_2(\omega_0), \dots, \mathbf{a}_M(\omega_0)]$ 表示阵列流形矩阵,其中 $\mathbf{a}_i(\omega_0) = [1, e^{-j\omega_0 \frac{d \sin \theta_i}{c}}, \dots, e^{-j\omega_0 \frac{(N-1)d \sin \theta_i}{c}}]^T$ 为导向矢量。

2 幅相误差校正算法

2.1 MUSIC 算法

多信号分类算法对天线阵列结构要求低,无论是线阵、圆阵还是面阵都可以得到较高的测向性能。MUSIC 算法的运算过程,首先是将任意阵列的输出数据进行协方差运算,然后对其特征分解,进而得到信号子空间和噪声子空间,利用这两个子空间的正交性来估计入射信号的来波方向。

由式(7)求得协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_X = E[\mathbf{X}(t) \mathbf{X}(t)^H] \quad (8)$$

其中,上标 H 表示共轭转置运算,将式(8)进一步展开得:

$$\mathbf{R}_X = E[(\mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t))(\mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t))^H] = \mathbf{A}\mathbf{R}_S\mathbf{A}^H + \mathbf{R}_N \quad (9)$$

其中, $\mathbf{R}_S = E[\mathbf{S}(t)\mathbf{S}^H(t)]$, $\mathbf{R}_N = E[\mathbf{N}(t)\mathbf{N}^H(t)]$ 分别表示信号和噪声的自相关矩阵, $\mathbf{R}_N = \sigma^2\mathbf{I}$, \mathbf{I} 是 $N \times N$ 维的单位矩阵. \mathbf{R}_X 为满秩矩阵, 对 \mathbf{R}_X 进行特征分解

$$\mathbf{R}_X = \mathbf{U}_S\boldsymbol{\Sigma}_S\mathbf{U}_S^H + \mathbf{U}_N\boldsymbol{\Sigma}_N\mathbf{U}_N^H \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\Sigma}_S$ 为大特征值组成的对角阵, $\boldsymbol{\Sigma}_N$ 为小特征值组成的对角阵, \mathbf{U}_S 是由大特征值对应的特征向量组成的信号子空间, \mathbf{U}_N 是由小特征值对应的特征向量组成的噪声子空间. 将空间谱定义为:

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{U}_N\mathbf{U}_N^H\mathbf{a}(\theta)} \quad (11)$$

根据正交性可得, 信号子空间对应的导向矢量 $\mathbf{a}(\theta)$ 与 \mathbf{U}_N 相乘是一个趋于零的值, 所以 $P_{MUSIC}(\theta)$ 在信号源方向会产生尖锐的谱峰, 而在其余方向相对平缓, 对空间谱进行谱峰搜索即可得到入射信号的来波方向.

2.2 单辅助信源校正算法

当考虑到接收通道失配误差时, 天线阵列接收到的数据形式变为:

$$\mathbf{X}(t) = \text{diag}(\boldsymbol{\Gamma})\mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (12)$$

式中: $\boldsymbol{\Gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N]^T$ 表示由于通道失配而产生的幅相误差矩阵, $\gamma_m = \rho_m e^{j\varphi_m}$, ρ_m 和 φ_m 表示每个阵元的幅度和相位误差.

已知辅助信源方位角为 α_1 , 由式(9)可知, 当存在接收通道失配误差时, 阵列接收数据的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_X = \text{diag}(\boldsymbol{\Gamma})\mathbf{A}\mathbf{R}_S\mathbf{A}^H\text{diag}(\boldsymbol{\Gamma}) + \mathbf{R}_N \quad (13)$$

对其进行特征分解, 可以得到方位角 α_1 的导向矢量的估值如下:

$$\hat{\mathbf{a}}(\alpha_1) = \boldsymbol{\Gamma} \cdot \mathbf{a}(\alpha_1) = \frac{\mathbf{e}_1}{e_{11}} \quad (14)$$

式中: $\hat{\mathbf{a}}(\alpha_1)$ 为存在误差时的导向矢量, $\mathbf{e}_1 = [e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1N}]^T$ 为最大特征值对应的特征向量, 则可得出:

$$\gamma_m = \frac{e_{1m}}{e_{11}a_m(\alpha_1)}, m = 2, 3, \dots, N \quad (15)$$

上文已假设第一个阵元为参考阵元, 则 $\gamma_1 = 1$.

2.3 校正方法

本文采用两种校正方法:

方法一, 通道数据预补偿算法是指在构建协方差矩阵 \mathbf{R}_X 之前对接收的数据矢量 $\mathbf{X}(t)$ 进行校正. 由式(15)根据单辅助信源校正算法求得校正矩阵 $\hat{\boldsymbol{\Gamma}} = [1 \ \dots \ \gamma_m]$, 此时的阵列流形矩阵 $\hat{\mathbf{A}} = \text{diag}(\boldsymbol{\Gamma})\mathbf{A}$, $\hat{\mathbf{A}}$ 为含有幅相误差的阵列流形矩阵, 对其进行校正得:

$$\mathbf{X}(t) = \frac{1}{\text{diag}(\hat{\boldsymbol{\Gamma}})}\hat{\mathbf{A}}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) = \frac{\text{diag}(\boldsymbol{\Gamma})}{\text{diag}(\hat{\boldsymbol{\Gamma}})}\mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (16)$$

误差矩阵 $\text{diag}(\boldsymbol{\Gamma})$ 与校正矩阵 $\text{diag}(\hat{\boldsymbol{\Gamma}})$ 相除抵消后

得到理想环境下的阵列流形矩阵 \mathbf{A} , 再根据 MUSIC 算法估计待测信号的来波方向:

$$P_{AD\ MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\hat{\mathbf{a}}^H(\theta)\hat{\mathbf{U}}_N\hat{\mathbf{U}}_N^H\hat{\mathbf{a}}(\theta)} \quad (17)$$

此时空间谱函数中的 $\hat{\mathbf{a}}^H(\theta)$ 是含有幅相误差的导向矢量; $\hat{\mathbf{U}}_N$ 是由式(16)和(8)构建协方差矩阵并特征分解, 得到新噪声子空间对应的特征矢量矩阵.

方法二, 现有的导向矢量修正算法是在式(11)谱峰搜索时对 $\hat{\mathbf{a}}(\theta)$ 进行误差校正, 即:

$$\hat{P}_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{(\text{diag}(\hat{\boldsymbol{\Gamma}})\hat{\mathbf{a}}(\theta))^H\mathbf{U}_N\mathbf{U}_N^H(\text{diag}(\hat{\boldsymbol{\Gamma}})\hat{\mathbf{a}}(\theta))} \quad (18)$$

式中: \mathbf{U}_N 是由式(12)和(8)联立求出含有幅相误差时的噪声子空间.

3 实验验证

为了验证算法的波达估计性能, 本节将进行一系列的计算机数值模拟实验和结果分析; 在 3.3 节利用采集到的实测数据进一步验证该算法的有效性; 并采用了一个评判标准的指标, 即均方根误差 (root mean square error, RMSE).

RMSE 定义如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{\text{sam}} (\hat{\theta}_i(k) - \theta_i)^2}{\text{sam}}} \quad (19)$$

式中: $\hat{\theta}_i(k)$ 表示第 k 次实验估计第 i 个信源的来波方向, θ_i 表示第 i 个信源的真实来波方向, sam 表示蒙特卡洛实验次数.

实验中假设等距均匀线阵的阵元数为 4 个, 阵元间距为 $\lambda/2$ (λ 为信号波长), 快拍数为 161, 信噪比为 5 dB, 噪声为独立于信号的高斯白噪声, 辅助信源角度为 9° , 待测信源角度为 -15° , 均为 QPSK 信号 (滚降因子为 0.25, 截断长度为 6, 每个符号的采样数量为 8), 误差矩阵 $\boldsymbol{\Gamma} = [e^{-j\sin(0^\circ \frac{\pi}{180})}, 0.703 \ e^{-j\sin(21.35^\circ \frac{\pi}{180})}, 0.666 \ e^{-j\sin(-10.09^\circ \frac{\pi}{180})}, 0.843 \ 5e^{-j\sin(19.11^\circ \frac{\pi}{180})}]$, 实验结果如图 2 所示.

从图 2 可以看出, 阵列存在通道失配误差时, 谱峰的幅度与理想环境下相比有所减小, 尖锐程度也随之降低, 谱峰最大值对应的方位信息也发生了明显偏移. 经过算法校正后, 谱峰最大值对应的空间谱幅度由 3.8 dB 提升到 18.2 dB; 方位估计也更加精准, 与仿真预设角度一致, 由 -12° 精确至 -15° ; 尖锐程度也有明显的改善.

3.1 信噪比对估计性能的影响

图 3 表示两种算法的均方根误差与信噪比之间的关系, 辅助信源和待测信源角度分别在 $[-30^\circ, -10^\circ]$ 、 $[0^\circ, 35^\circ]$ 区间内随机产生, 误差矩阵也随机产生, 信噪比变换范围为

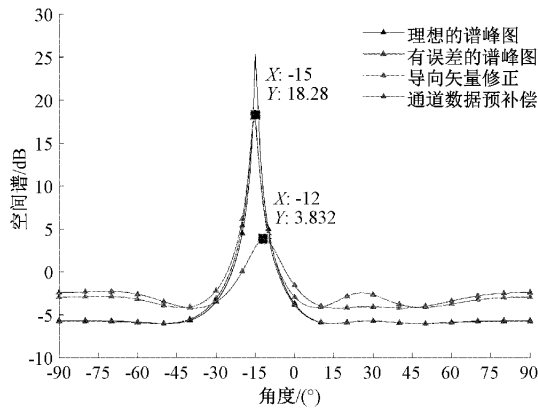


图 2 空间谱函数

0~20 dB,步长为 5 dB,蒙特卡洛仿真实验次数为 200 次。从图可以看出信噪比对 DOA 估计性能有一定的影响,随着信噪比的增加两种算法的均方根误差逐渐降低,并且两种算法的 RMSE 曲线下降趋势几乎一致;在信噪比为 5 dB 时,两者的均方根误差迅速降至 0.7 左右,达到较高的估计精度,再增加信噪比对估计性能影响不大。实验得到通道数据预补偿算法与导向矢量修正算法有着近乎一致的估计性能。

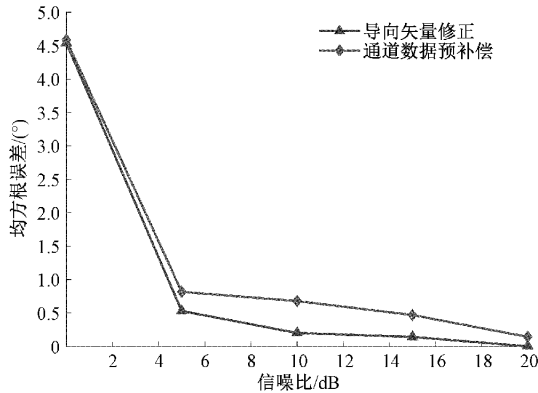


图 3 均方根误差随信噪比的变化

图 4 表示信噪比对两种算法空间谱曲线的影响。虚线对应横坐标 -15°,从图可以得出随着信噪比的增加,谱峰的幅度和尖锐程度都在不断的提高,中心位置的偏移也得到了较好的修正。

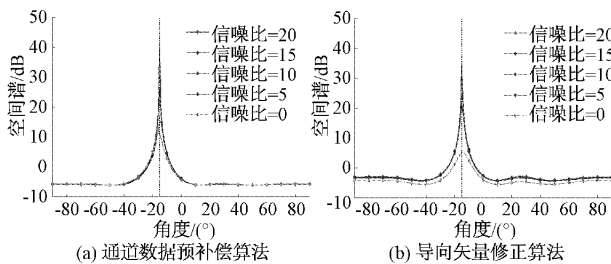


图 4 空间谱随信噪比的变化

3.2 快拍数对估计性能的影响

图 5 表示快拍数对算法空间谱曲线的影响。虚线对应横坐标 -15°,从实验结果可以看出,谱峰的峰值随着快拍数的增加的而不断提高,中心位置几乎没有发生偏移,两种算法均有着优良的估计性能。

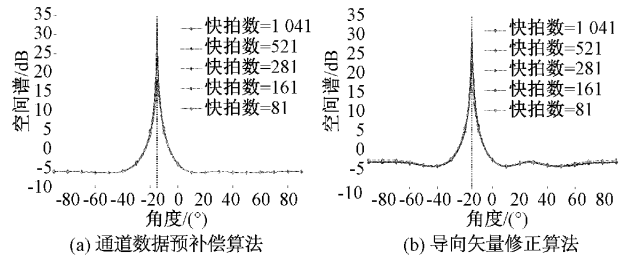


图 5 空间谱随快拍数的变化

3.3 实测数据验证

用于校正算法验证的 MUSIC 测向原型系统如图 6 所示,此系统包括天线阵元组成的接收阵列、通用软件无线电外设(universal software radio peripheral, USRP)、信号发射源、辐射天线等调试设备。该系统可分为 3 部分:目标空间、观察空间和估计空间。目标空间即为真实来波信号所构成的空间,通过信号发射源来模拟;由天线阵列和多通道信号接收机构成观察空间,多通道信号接收机由 USRP 代替;估计空间是指将观察空间得到的二进制 IQ 数据进行“解码”和运算,得到辐射信号的来波方向,该部分由上位机负责。

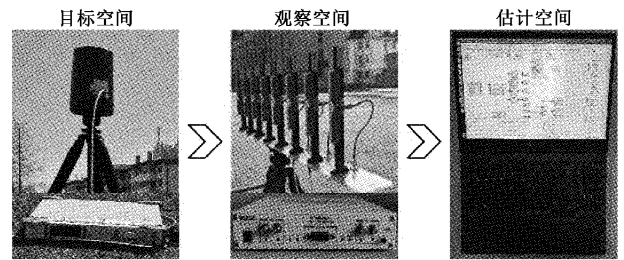
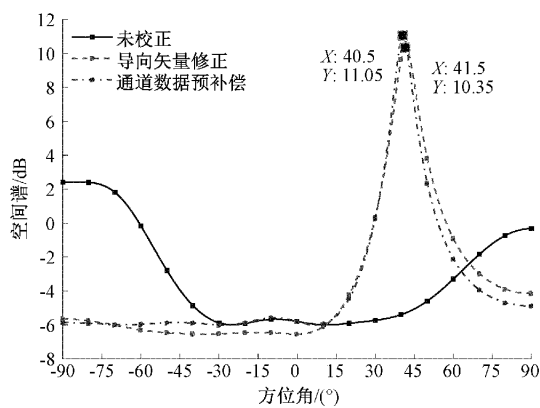


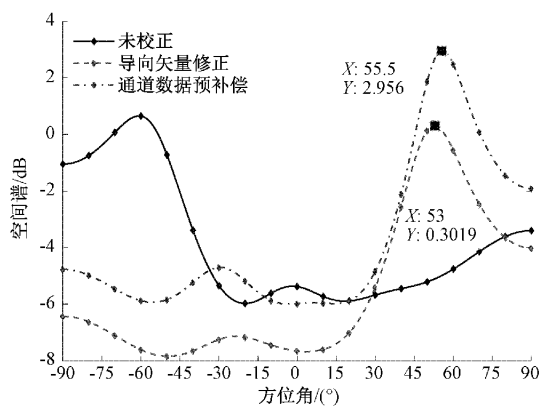
图 6 MUSIC 空间谱测向原型系统

在实验中,发射频率为 1.76 GHz,发射功率为 -5 dBm,接收阵列为四通道均匀线阵,阵元间距为 80 mm,快拍数为 512,实验结果如图 7 所示。

如图 7(a)所示,辅助信源方位是 50.2°,待测信源方位是 41.4°,实测数据没有经过校正的空间谱曲线未出现谱峰,没有空间谱指向,数据无效;经过通道数据预补偿、导向矢量修正后的空间谱曲线谱峰和基底的差值提升至 17 dB,出现尖锐的谱峰,信号波束的幅度和方位得到有效校正。其中,通道数据预补偿后的空间谱指向 40.5°,导向矢量修正后的空间谱指向 41.5°。图 7(b)中辅助信源角度为 0°,待测信源角度为 50.2°,通道数据预补偿和导向矢量修正后的空间谱指向角分别为 55.5°和 53°。由图 7 可知,经过单辅助源校正后,空间谱有明显改善。在两种波束入



(a) 41.4°



(b) 50.2°

图 7 实测数据校正后的空间谱测向结果

射角下,通道数据预补偿算法的估计角度分别为 40.5° 和 55.5° ,接近真实数值。可见,本文采用的基于单辅助信源的通道校正算法有效可行。

在空间谱 MUSIC 测向系统中,传统校正方法是接收机通道校正,是指对多个接收通道间幅度和相位不一致性进行修正补偿的过程。

为了对比本文方法和传统接收机通道校正方法对于空间谱测向的改善性能,以单辅助信源校正算法用于通道数据预补偿为例,将待测信源方位角设为 22.5° ,采集数据经过通道数据预补偿和接收机通道校正后,空间谱曲线出现有效谱峰,峰值指向正确。通道数据预补偿算法与接收机通道校正相比,不仅考虑了接收通道误差对测向性能的影响,而且对天线阵列和传输电缆误差进行了有效校正。因此,由图 8 可知通道数据预补偿算法的空间谱曲线起伏更大,谱峰更为明显。

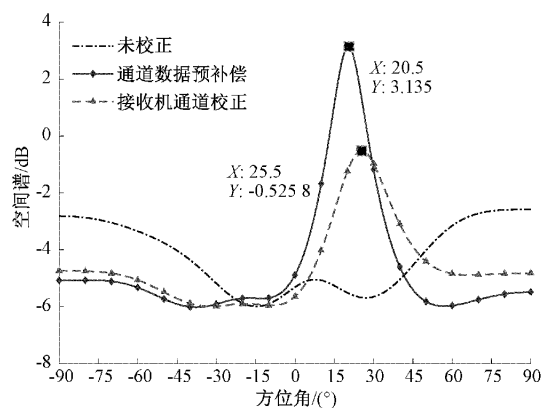


图 8 本文方法和传统校正方法对比

4 结 论

本文针对 MUSIC 测向系统中各接收通道幅相不一致问题,根据通道失配产生的原因和特征,采用一种单辅助信源的通道校正算法。通过仿真实验分析得出,将单辅助信源校正获得的通道误差估计值,应用于通道数据补偿和谱峰搜索阶段的导向矢量修正,在不同信噪比环境下的均方根误差曲线基本拟合,两种应用方法性能相近,DOA 估计性能比校正前明显提升。外场实验平台验证了该算法有效可行,具有实际应用价值。

参考文献

- [1] JIANG G Q, MAO X P, LIU Y T. Direction-of-arrival estimation for uniform circular arrays under small sample size[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(6): 1142-1150.
- [2] GUPTA P, AGRAWAL M. Design and analysis of the sparse array for DoA estimation of noncircular signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(2): 460-473.
- [3] 范文泉,肖文书.基于 MUSIC 和 ESPRIT 算法的 DOA 动态布站[J].电子测量技术,2019,42(2):142-148.
- [4] 梁涛,杨波,朱敏,等.基于波束形成的均匀方阵虚拟基元定位方法[J].仪器仪表学报,2021,42(2):266-274.
- [5] 杜永兴,李晨璐,秦岭,等.多径环境下阵列波达方向估计及互耦校正[J].微波学报,2019,35(3):24-28,33.
- [6] 孙兵,阮怀林,吴晨曦,等.幅度相位误差条件下的互质阵列 DOA 估计方法[J].系统工程与电子技术,2021, 43(12):3488-3494.
- [7] 陈鹏,陈志敏,方兰婷,等.存在阵列误差时稀疏相关信号的 DOA 估计[J].国外电子测量技术,2019,38(12): 41-44.
- [8] 张杰,张良. MUSIC 算法的性能分析与改进[J].电子测量技术,2017,40(10):109-112.
- [9] 李蜀丰,徐永绍,刘秉政,等.基于改进 MUSIC 的声源定位方法[J].电子测量与仪器学报,2021, 35(8):

- 212-219.
- [10] 周晓飞,冯海泓,黄敏燕,等.一种均匀线阵互耦校正算法[J].声学技术,2016,35(3):270-275.
- [11] 王鼎,潘苗,吴瑛.基于辅助阵元的方位依赖幅相误差最大似然自校正:针对确定信号模型[J].通信学报,2011,32(2):34-41,47.
- [12] 陈曦,杨龙,吴丹,等.幅相误差对阵列天线相位中心的影响分析[J].电波科学学报,2016,31(6):1195-1201.
- [13] 唐晓雷,张令坤,陈飞.通道幅相误差对数字阵列天线性能影响及校准[J].太赫兹科学与电子信息学报,2016,14(4):562-566.
- [14] 李存勛,陈伯孝.基于空域稀疏性的方位依赖阵列误差校正算法[J].电子与信息学报,2017,39(9):2219-2224.
- [15] 林潇,薛敬宏,乔晓林.基于降维的极化敏感阵列幅相误差自校正算法[J].现代雷达,2020,42(10):51-56.
- [16] DAI Z, SU W M, GU H, et al. Sensor gain-phase errors estimation using disjoint sources in unknown directions[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(10): 3724-3730.
- [17] 倪萌钰,陈辉,倪柳柳,等.近场源幅相及阵元位置误差的校正算法[J].空军预警学院学报,2019,33(3):169-174.

作者简介

郝崇宇,硕士研究生,主要研究方向为空间谱测向技术。

E-mail: 994923934@qq.com

施伟,副研究员,主要研究方向为天线技术,阵列信号处理。

E-mail: w.shi@nudt.edu.cn

王保卫,教授,主要研究方向为无线传感器网络,物联网数据安全,可信数据交易,信息隐藏与数字水印。

E-mail: wbw.first@163.com