

一种阵列天线阵元幅相、位置误差校正方法

袁自月* 牛一鸣 杨国 吴文
(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

摘要: 针对毫米波热辐射信号弱的问题, 该文提出一种对存在阵元幅相、位置误差的线阵进行校正的方法。该文基于低信噪比(SNR)的阵列误差模型, 利用单个校正源, 其信源方向未精确已知, 通过旋转天线阵列在多个校正方位测得校正数据, 并估计出阵元幅相、位置误差参数, 从而对阵列中的阵元幅相、位置误差进行联合校正。该方法运算复杂度低, 具有较高的估计精度, 校正性能良好。理论分析和计算机仿真结果表明了该文方法的有效性。

关键词: 阵列天线; 毫米波; 幅相误差; 位置误差; 校正

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)09-2232-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01807

A Calibration Method for Sensor Gain/Phase and Position Errors of Array Antenna

Yuan Zi-yue Niu Yi-ming Yang Guo Wu Wen

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, China)

Abstract: In view of the weakness of millimeter wave radiation signals' energy, a calibration method for linear array with the presence of sensor gain, phase and position errors is presented. Based on the array distortion model at low Signal-to Noise Ratio (SNR), and through using a single signal source without knowing exact orientation, the calibration data in multiple angles is obtained by rotating the array antenna, and sensor gain, phase and position error parameters are estimated, thus accomplishing the joint calibration of gain, phase and position errors. The proposed method offers a less complex computation process with higher precision of estimation and good calibration performance. The theoretical analysis and computer simulation results show the effectiveness of the method.

Key words: Array antenna; Millimeter wave; Gain/phase error; Position error; Calibration

1 引言

利用毫米波辐射计探测目标是一种有效的无源探测方法, 该方法具有隐蔽性好, 不受气候条件和战场烟尘影响等优点^[1]。综合孔径辐射计成像技术利用稀疏的小天线阵列合成大的虚拟口径^[2], 对目标场景进行成像及探测具有波束控制灵活^[3]、信号增益高、抗干扰能力强及空间超分辨率能力高等优点, 因而受到极大的关注^[4]。但在实际应用中, 阵元间的互耦^[5]、阵元幅相误差^[6,7](包括各阵元性能不一致和通道间的幅频和相频特性不一致)、阵元位置误差等^[8], 会降低毫米波辐射计的探测性能与成像效果。本文主要研究阵元幅相、位置误差的校正方法。

目前, 国内外一些学者正致力于阵列误差校正方法的研究, 现有的校正方法主要分为盲校正^[9,10]

和有源校正两大类^[11,12]。有源校正是在空间设置方位已知的辅助源对阵列误差参数进行离线估计, 这类算法运算量小、实现简单, 在实际中应用较为广泛。目前大多有源校正算法都仅适用于高 SNR^[13]的情况(如雷达, 声呐, 移动通信等领域), 如文献[14]和文献[15]提出的校正阵元幅相、位置误差的单辅助源校正方法, 在低 SNR 时, 该类算法将失效。对于低 SNR 的情况, 如文献[16]和文献[17]提出的快速校正法仅能对阵元幅相误差进行校正。

针对毫米波接收信号弱, 本文提出了一种对存在阵元幅相、位置误差的线阵进行校正的单辅助源方法。假设在空间远场某处固定一校正源, 无需精确已知信源方向, 在校正过程中, 阵列天线再以已知角度旋转两次, 此时空间中相当于有 3 个分时发射的校正源。该方法在获得这 3 个校正方位测得的校正数据后利用改进算法估计得到阵元幅相、位置误差参数, 从而实现对待测信源的观测协方差矩阵的校正。

2 阵列输出模型与问题的提出

如图1所示，空间中有 D 个远场窄带非相干信号辐射到由 N 个全向阵元构成的线阵，阵元最小间距 $d = \lambda/2$ ， λ 为波长。第 j 个信号入射方向与天线法平面的夹角为 $\theta_j, j = 1, 2, \dots, D$ ，考虑到存在阵元位置误差，定义阵列的方向矢量为

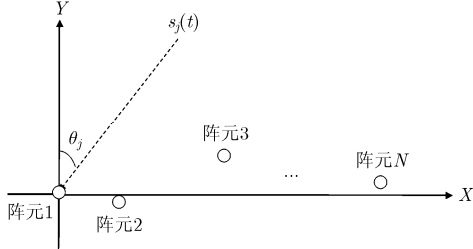


图1 信号入射到 N 元线阵示意图

$$\mathbf{a}(\theta_j) = \begin{bmatrix} \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}(x_1 \sin \theta_j + y_1 \cos \theta_j)\right] \\ \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}(x_2 \sin \theta_j + y_2 \cos \theta_j)\right] \cdots \\ \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}(x_N \sin \theta_j + y_N \cos \theta_j)\right] \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式中， $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_D]^T$ ， $x_i = x_{di} + \Delta x_i, y_i = y_{di} + \Delta y_i, i = 1, 2, \dots, N$ ，其中， $\Delta x_i, \Delta y_i$ 为第 i 阵元的位置误差；设以阵列的第1个阵元作为参考阵元，则第 i 阵元的标称坐标为 $x_{di}, y_{di} = 0$ 。

以第1阵元作为增益和相位的基准，当阵列存在幅相误差时，定义阵元幅相误差矩阵为

$$\boldsymbol{\Gamma} = \text{diag}[1 \ \Gamma_2 \ \Gamma_3 \ \dots \ \Gamma_N] \quad (2)$$

式中， $\text{diag}(\bullet)$ 表示由行(列)向量构成对角矩阵， $\Gamma_i = g_i \exp(j\phi_i), i = 1, 2, \dots, N$ ，其中， g_i 为第 i 阵元的增益， ϕ_i 为第 i 阵元的相位，且 $g_1 = 1, \phi_1 = 0$ 。

则阵列在 t 时刻的输出数据模型为

$$\mathbf{X}(t) = \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{S}(t) + \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{N}(t) \quad (3)$$

式中， $\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_N(t)]^T$ 为阵列输出的 $N \times 1$ 维快拍数据矢量； $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) = [\mathbf{a}(\theta_1) \ \mathbf{a}(\theta_2) \ \dots \ \mathbf{a}(\theta_D)]^T$ 为 $N \times D$ 维阵列流型矩阵； $\mathbf{S}(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_D(t)]^T$ 为 $D \times 1$ 维输入信号矢量； $\mathbf{N}(t) = [n_1(t) \ n_2(t) \ \dots \ n_N(t)]^T$ 为 $N \times 1$ 维噪声数据矢量，是各自独立且与信号不相关的白噪声。此模型为低SNR情况下的阵列输出模型，综合了考虑阵元误差对接收信号和接收通道噪声的影响。

根据式(3)，可得阵列输出的协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(t) \mathbf{X}(t)^H] = \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{R}_s \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})^H \boldsymbol{\Gamma}^H + \sigma_n^2 \boldsymbol{\Gamma} \boldsymbol{\Gamma}^H \quad (4)$$

式中， \mathbf{R}_s 为信号协方差矩阵， σ_n^2 为噪声功率。

实际中，因采样快拍数 K 有限，只能测得阵列输出数据协方差矩阵在有限样本下的估计值，采用最大似然估计法，有

$$\mathbf{R} = \frac{1}{K} \sum_{t=1}^K \mathbf{X}(t) \mathbf{X}(t)^H \quad (5)$$

3 阵列误差参数估计

3.1 SSLS算法^[4]介绍及改进算法

低信噪比的单辅助源阵元幅相误差校正方法(Single Source calibration method for sensor amplitude and phase errors at Low SNR, SSLS)是一种基于方位已知的单辅助源通道幅相误差校正方法，不考虑阵元位置误差。根据低SNR情况下，协方差矩阵为对角占优矩阵，该算法将校正场景的协方差矩阵 \mathbf{R} 分为两部分：对角线部分和上三角部分。

根据式(4)可知，一单辅助源从 θ_s 方向入射时，校正场景协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = \sigma_s^2 \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{a}(\theta_s) \mathbf{a}(\theta_s)^H \boldsymbol{\Gamma}^H + \sigma_n^2 \boldsymbol{\Gamma} \boldsymbol{\Gamma}^H \quad (6)$$

式中， σ_s^2 为从 θ_s 方向入射的信号源到达天线口面功率。

首先，由 \mathbf{R} 的对角线部分不包含相位信息可直接求得通道的幅度误差为

$$\begin{bmatrix} 1 & |\Gamma_2| & |\Gamma_3| & \dots & |\Gamma_N| \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \sqrt{\mathbf{R}_{11}} & \sqrt{\mathbf{R}_{22}} & \sqrt{\mathbf{R}_{33}} & \dots & \sqrt{\mathbf{R}_{NN}} \end{bmatrix}^T / \sqrt{\mathbf{R}_{11}} \quad (7)$$

其次， $\text{angle}(\mathbf{R}_{ij})$ ($\text{angle}(\bullet)$ 表示取其相位信息)是由第 i, j 通道的相位误差以及信号到达第 i, j 天线口面的延迟组成。故先构造信号相位矩阵 \mathbf{R}_{sou} 消除信号到达天线口面的延迟所造成的相位影响，并经 2π 相位模糊因子 \mathbf{X}_{ij} 校正，得到阵元的相位误差矩阵 \mathbf{W} ，并取其上三角部分构成矩阵 \mathbf{H} ：

$$\mathbf{H} = \text{angle}(\mathbf{R} \circ \text{conj}(\mathbf{R}_{\text{sou}})) - \mathbf{X}_{ij}, i < j \quad (8)$$

式中， \circ 表示Hardmard积。

又

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & \phi_2 & \phi_3 & \phi_4 & \dots & \phi_N \\ & 0 & \phi_3 - \phi_2 & \phi_4 - \phi_2 & \dots & \phi_N - \phi_2 \\ & & 0 & \phi_4 - \phi_3 & \dots & \phi_N - \phi_3 \\ & & & 0 & \ddots & \dots \\ & & & & & 0 & \phi_N - \phi_{N-1} \\ & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

取 \mathbf{H} 的上三角部分，按照从上到下从左向右的

顺序组成列向量 $\text{tri_up}(\mathbf{H})$, 并构造一 \mathbf{M} 矩阵, 使式(10)成立:

$$\text{tri_up}(\mathbf{H}) = \mathbf{M} \times [\phi_2 \ \phi_3 \ \cdots \ \phi_N]^T \quad (10)$$

利用最小二乘法求解式(10), 可得

$$[\phi_2 \ \phi_3 \ \cdots \ \phi_N]^T = \mathbf{M}^+ \times \text{tri_up}(\mathbf{H}) \quad (11)$$

其中, \mathbf{M}^+ 表示 \mathbf{M} 的广义逆矩阵。

最后, 利用式(7)和式(11)估计得到的阵元幅度、相位误差参数校正目标场景的协方差矩阵。

由分析可知, 该方法未充分利用 \mathbf{W} 矩阵的性质, 在假设条件成立的基础上, 相位误差可仅由其第 1 行 \mathbf{W}_{1j} , $j = 1, 2, \dots, N$ (或第 1 列 \mathbf{W}_{i1} , $i = 1, 2, \dots, N$) 估计求出, 无需对整个上三角部分进行处理, 分析如下:

根据假设条件, 以第 1 阵元作为相位的基准, 即 $\phi_1 = 0$, 此时

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{W}_{1j} &= \mathbf{H}_{1j} = \phi_j - \phi_1 = \phi_j \\ \mathbf{W}_{i1} &= \phi_1 - \phi_i = -\phi_i \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

可求得

$$[\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_N]^T = \mathbf{W}_{1j} \text{ 或 } [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_N]^T = -\mathbf{W}_{i1} \quad (13)$$

3.2 扩展算法的提出

基于以上分析, 下面将推导本文提出的阵元幅相、位置误差校正法。

假定以阵列的第 1 个阵元作为参考阵元, 置于坐标原点; 以一固定方位的校正源方向(未精确已知)作为 \mathbf{Y} 轴方向, 记为 θ_1 , 且 $\theta_1 = 0$; 阵列天线两次相对于 \mathbf{Y} 轴的旋转角度分别为 θ_2, θ_3 , 此时相当于有 3 个分时工作的同频窄带校正源。 N 个阵元在此坐标系下的坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$, 其中 $(x_1, y_1) = (0, 0)$ 。

根据式(4)可得阵列在这 3 个校正方位的观测数据协方差矩阵为

$$\mathbf{R}^{(k)} = \sigma^2 \mathbf{\Gamma} \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}(\theta_k)^H \mathbf{\Gamma}^H + \sigma_n^2 \mathbf{\Gamma} \mathbf{\Gamma}^H, \quad k = 1, 2, 3 \quad (14)$$

式中, σ^2 为从 θ_1 方向入射的信号源到达天线口面功率。且由式(1)可知, 阵元位置误差会影响接收信号的相位, 但并不影响阵元的增益, 阵元的幅度误差仍可根据式(9)估计求得

$$\begin{aligned} & [g_1 \ g_2 \ \cdots \ g_N]^T \\ &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 \left(\left[\sqrt{\mathbf{R}_{11}^{(k)}} \ \sqrt{\mathbf{R}_{22}^{(k)}} \ \cdots \ \sqrt{\mathbf{R}_{NN}^{(k)}} \right]^T / \sqrt{\mathbf{R}_{11}^{(k)}} \right) \\ & \quad k = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (15)$$

对于阵元相位、位置误差将作为一整体进行估计。根据式(3)可得, 阵列存在阵元幅相、位置误差

时, $\theta_k, k = 1, 2, 3$ 方向的方向矢量为

$$\begin{aligned} & \mathbf{a}'(\theta_k) \\ &= \left[1 \ g_2 \exp(j\phi_2) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (x_2 \sin \theta_k + y_2 \cos \theta_k)\right) \cdots \right. \\ & \quad \left. g_N \exp(j\phi_N) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (x_N \sin \theta_k + y_N \cos \theta_k)\right) \right]^T \\ &= \left[1 \ g_2 \exp(j\phi_2) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (x_{d2} \sin \theta_k + y_{d2} \cos \theta_k)\right) \cdots \right. \\ & \quad \left. g_N \exp(j\phi_N) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (x_{dN} \sin \theta_k + y_{dN} \cos \theta_k)\right) \right]^T \\ &= \mathbf{\Gamma}^{(k)} \cdot \mathbf{a}_d(\theta_k) \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $\mathbf{\Gamma}^{(k)} = \text{diag}[1 \ g_2 \exp(j\phi_2) \ \cdots \ g_N \exp(j\phi_N)]$, 其中 ϕ_i 表示第 i 阵元相位和位置误差的总误差, 即

$$\phi_i = \phi_i - \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta x_i \sin \theta_k + \Delta y_i \cos \theta_k), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

$\mathbf{a}_d(\theta_k)$ 表示无误差的理想导向矢量, 如式(18)所示。

$$\begin{aligned} & \mathbf{a}_d(\theta_k) = \left[1 \ \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (x_{d2} \sin \theta_k + y_{d2} \cos \theta_k)\right) \cdots \right. \\ & \quad \left. \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (x_{dN} \sin \theta_k + y_{dN} \cos \theta_k)\right] \right]^T \end{aligned} \quad (18)$$

设 $\mathbf{R}_{\text{sou}}(\theta_k) = \mathbf{a}_d(\theta_k) \mathbf{a}_d(\theta_k)^H$, 有

$$\begin{aligned} & \mathbf{R} \circ \text{conj}(\mathbf{R}_{\text{sou}}) \\ &= \mathbf{\Gamma}^{(k)} \left(\sigma_s^2 \mathbf{a}_d(\theta_k) \mathbf{a}_d(\theta_k)^H + \sigma_N^2 \mathbf{I} \right) \left(\mathbf{\Gamma}^{(k)} \right)^H \\ & \quad \circ \text{conj} \left(\mathbf{a}_d(\theta_k) \mathbf{a}_d(\theta_k)^H \right) \\ &= \boldsymbol{\beta}^{(k)} \left(\boldsymbol{\beta}^{(k)} \right)^H \circ \left(\sigma_s^2 \mathbf{a}_d(\theta_k) \mathbf{a}_d(\theta_k)^H + \sigma_N^2 \mathbf{I} \right) \\ & \quad \circ \text{conj} \left(\mathbf{a}_d(\theta_k) \mathbf{a}_d(\theta_k)^H \right) \\ &= \boldsymbol{\beta}^{(k)} \left(\boldsymbol{\beta}^{(k)} \right)^H \circ \left(\sigma_s^2 \mathbf{E} + \sigma_N^2 \mathbf{I} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

式中, $\boldsymbol{\beta}^{(k)}$ 是由 $\mathbf{\Gamma}^{(k)}$ 中对角线元素按顺序组成的列向量, \mathbf{E} 为 N 维全 1 矩阵, \mathbf{I} 为 N 维单位矩阵; 取其相位信息 $\boldsymbol{\Psi}^{(k)} = \text{angle}(\mathbf{R} \circ \text{conj}(\mathbf{R}_{\text{sou}}))$, 由 $\varphi_1 = \phi_1 - \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta x_1 \sin \theta + \Delta y_1 \cos \theta) = 0$, 根据式(12)可知:

$$\boldsymbol{\Psi}_{1j}^{(k)} = \varphi_j + 2\pi l, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (20)$$

其中 l 为整数, $2\pi l$ 为由相位周期引起的 2π 相位模糊校正项; 即总误差 φ_j 可由经 2π 模糊校正后 $\boldsymbol{\Psi}^{(k)}$ 的第 1 行 $\psi^{(k)}$ 求得, 其中 $\psi^{(1)} = \boldsymbol{\Psi}_{1j}^{(1)}$, $\psi^{(k)}$ 推导为

$$\begin{aligned} & \text{令 } \Delta \boldsymbol{\Psi}_{1j}^{(l)} = \boldsymbol{\Psi}_{1j}^{(l+1)} - \boldsymbol{\Psi}_{1j}^{(l)}, \quad l = 1, 2, \\ & \left. \begin{aligned} \psi^{(l+1)} &= \boldsymbol{\Psi}_{1j}^{(l+1)} + 2\pi, \Delta \boldsymbol{\Psi}_{1j}^l < -\pi \\ \psi^{(l+1)} &= \boldsymbol{\Psi}_{1j}^{(l+1)} - 2\pi, \Delta \boldsymbol{\Psi}_{1j}^l > \pi \\ \psi^{(l+1)} &= \boldsymbol{\Psi}_{1j}^{(l+1)}, \quad \text{其它} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

将式(21)代入式(17), 得

$$\psi^{(k)} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_N \end{bmatrix} - \frac{2\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} \Delta x_1 & \Delta y_1 \\ \Delta x_2 & \Delta y_2 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta x_N & \Delta y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_k \\ \cos \theta_k \end{bmatrix}, \quad k = 1, 2, 3 \quad (22)$$

令 $\Delta\psi^{(k)} = \psi^{(1)} - \psi^{(k+1)}$,

$$[\Delta\mathbf{X} \ \Delta\mathbf{Y}] = \begin{bmatrix} \Delta x_1 & \Delta x_2 & \cdots & \Delta x_N \\ \Delta y_1 & \Delta y_2 & \cdots & \Delta y_N \end{bmatrix}^T$$

可得

$$\begin{aligned} & [\Delta\psi^{(1)} \ \Delta\psi^{(2)}] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta\mathbf{X} \ \Delta\mathbf{Y}] \begin{bmatrix} \sin \theta_2 - \sin \theta_1 & \sin \theta_3 - \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 - \cos \theta_1 & \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

利用最小二乘法求解式(23), 可得

$$\begin{aligned} [\Delta\mathbf{X} \ \Delta\mathbf{Y}] &= \frac{\lambda}{2\pi} [\Delta\psi^{(1)} \ \Delta\psi^{(2)}] \\ &\cdot \begin{bmatrix} \sin \theta_2 - \sin \theta_1 & \sin \theta_3 - \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 - \cos \theta_1 & \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \end{bmatrix}^+ \end{aligned} \quad (24)$$

式中, 令 $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sin \theta_2 - \sin \theta_1 & \sin \theta_3 - \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 - \cos \theta_1 & \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \end{bmatrix}$, \mathbf{C}^+ 为

\mathbf{C} 的广义逆, $\mathbf{C}^+ = \mathbf{C}^H \cdot (\mathbf{C} \cdot \mathbf{C}^H)^{-1}$; 在实际处理中, $-\frac{\pi}{2} \leq \theta_k \leq \frac{\pi}{2}$, 且它们的角度差要尽量大些, 如将阵列天线按顺/逆时针各旋转一次; 要求 $\text{rank}(\mathbf{C}) = 2$, 如果 θ_k 之间的差很小, 则矩阵 \mathbf{C} 的两行接近相关, 求其广义逆时, 其解的特性会很差, 导致求出的 $[\Delta\mathbf{X} \ \Delta\mathbf{Y}]$ 坐标的误差也会很大。

将式(24)代入式(22), 可求得阵元的相位误差为

$$[\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_N]^T = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 \left(\psi^{(k)} + \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta\mathbf{X} \ \Delta\mathbf{Y}] \begin{bmatrix} \sin \theta_k \\ \cos \theta_k \end{bmatrix} \right) \quad (25)$$

通过式(15)、式(24) 和式(25)求得的阵元幅相、位置误差参数对阵列进行校正。最后对校正后的阵列采用多重信号分类(MUltiple SIgnal Classification, MUSIC)法估计待测信源波达方向来验证本文方法的正确性和有效性。

4 仿真结果分析

采用 Matlab 仿真比较了文献[4]中 SSLS 算法与本文算法对阵元幅相误差的校正效果, 并比较了文献[15]中传统算法(应用于高 SNR 情况下的校正算法)与本文算法对阵元幅相、位置误差的联合校正效果。

仿真条件: 12 阵元线阵, 等距线阵阵元理想位

置为 $[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] \cdot 0.5\lambda$, 稀疏线阵阵元理想位置为 $[0, 1, 2, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 26] \cdot 0.5\lambda$, 阵元幅相误差因子分别为: $g_i = 1 + (\vartheta_i - 0.5)\sigma_a \cdot \sqrt{12}$, $\phi_i = (\eta_i - 0.5)\sigma_b \cdot \sqrt{12}$, 其中, ϑ_i, η_i 均为 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数, σ_a, σ_b 为幅度、相位扰动标准差, 分别取值为 0.5° 与 20° ; 阵元位置误差均匀分布在 $[-0.4, 0.4] \cdot 0.5\lambda$ 范围内; 阵列天线两次旋转角度为 $-30^\circ, 30^\circ$, 校正源 SNR 为 -10 dB ; 3 个待测信号源的方位角分别为 $-45^\circ, 10^\circ, 45^\circ$, SNR 为 -20 dB , 采样数为 200。

从图 2 和图 3 可以看出, 阵列中存在阵元幅相误差时, 不仅大幅度降低了谱峰的幅度, 使谱峰展宽, 角度分辨力下降, 更严重的是使待测信源谱峰的位置发生了偏差; 且稀疏阵列的伪峰较多, 说明相对于等距阵列, 阵列误差对稀疏阵列的影响更大些。经校正后, 待测信源谱峰尖锐度高, 且无偏差, 分辨力高, 接近理想无误差曲线, 验证了本文算法的有效性。

从图 4 和图 5 可以看出, 存在阵元幅相、位置误差时, 不仅大幅度降低了谱峰的幅度, 使谱峰展宽及谱峰位置有偏差; 且相对于图 2 中未校正前的谱峰位置偏差更大, 可见, 阵元位置误差进一步影响了谱峰位置。经校正后, 传统算法失效, 待测信源谱峰尖锐度低, 有偏差, 分辨力低, 且相对于等距线阵, 稀疏线阵的校正效果更差; 而本文算法仍然有效, 接近理想无误差曲线。

实际情况下, 因采样快拍数有限、残余误差的存在等, 会使得实际的阵元幅相、位置误差更大, 校正效果也会差些, 但此仿真仍可说明本文方法可有效抑制阵元幅相、位置误差对毫米波辐射计中阵列接收信号的影响。

5 结束语

综上所述, 本文算法在对阵元幅相误差校正的情况下, 取得了与 SSLS 算法同样的校正效果; 与传统算法相比, 实现了在低信噪比情况下对阵元幅相、位置误差的联合校正, 且校正性能良好。本文针对毫米波热辐射信号弱的特点, 基于低信噪比的阵列误差模型, 提出了一种对阵元幅度、相位不一致性及位置误差进行联合估计的校正方法, 该方法同样适用于等距线阵和稀疏线阵。理论分析表明, 该算法简化了估计过程, 实现了对阵元幅相和位置误差的联合校正, 仿真结果验证了本文方法的正确性和有效性。

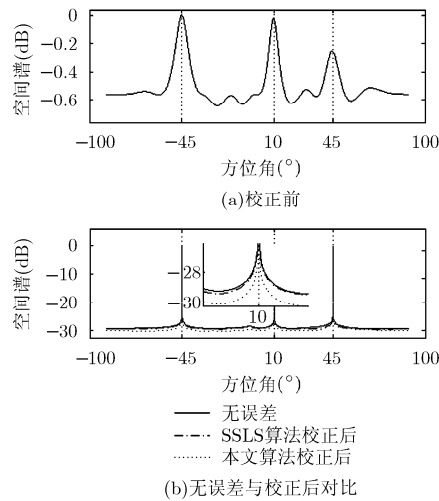


图2 等距线阵阵元幅相误差校正

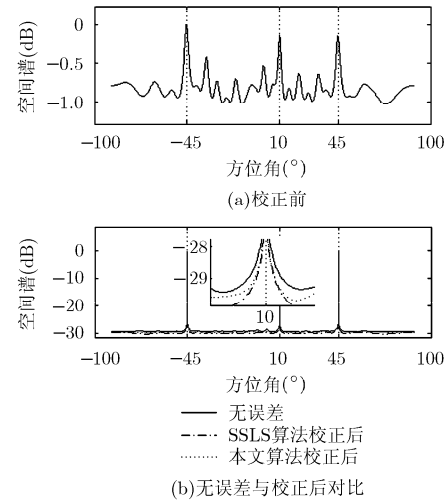


图3 稀疏线阵阵元幅相误差校正

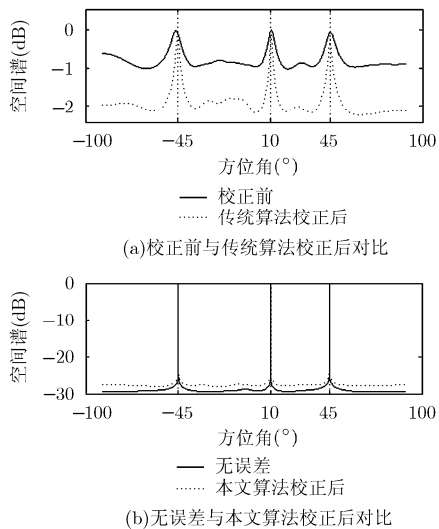


图4 等距线阵阵元幅相、位置误差联合校正

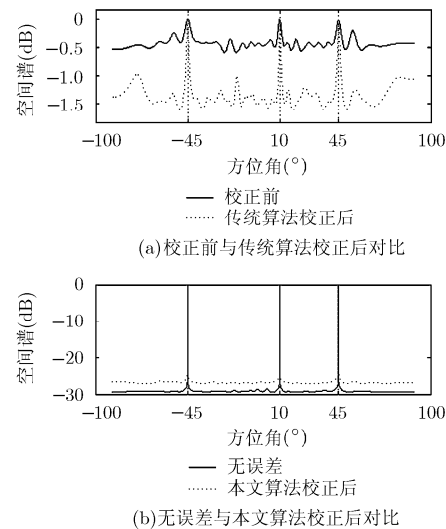


图5 稀疏线阵阵元幅相、位置误差联合校正

参考文献

- [1] 吴露露, 胡飞, 朱耀庭, 等. 毫米波热辐射阵列的空间谱估计误差模型研究[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(2): 123-127.
Wu Lu-lu, Hu Fei, Zhu Yao-ting, *et al.*. Error model for spatial spectrum estimation of millimeter-wave thermal radiation array[J]. *Journal of Infrared Millim-Waves*, 2010, 29(2): 123-127.
- [2] 孙逢林, 张升伟. 基于综合孔径辐射计系数非均匀采样图像的快速重建[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 927-932.
Sun Feng-lin and Zhang Sheng-wei. Fast image reconstruction for non-uniform sampling of thinned array of synthesis aperture radiometer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 927-932.
- [3] 刘肖萌, 高文军, 邓云凯, 等. 基于投影矩阵法的阵列天线波束形成方法[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 50-57.
Liu Xiao-meng, Gao Wen-jun, Deng Yun-kai, *et al.*. Beam synthesis technique for array antenna based on projection matrix algorithm[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 50-57.
- [4] 靳榕, 李青侠, 董健, 等. 低信噪比的接收通道阵列幅相误差校正方法[J]. 微波学报, 2010, 26(3): 68-72.
Jin Rong, Li Qing-xia, Dong Jian, *et al.*. Receiving array calibration method for amplitude and phase errors at low SNR[J]. *Journal of Microwaves*, 2010, 26(3): 68-72.
- [5] Meng Fan-kun, Dang Tong-xin, Luo Li-ping, *et al.*. A constrained algorithm for gain/phase and mutual coupling errors calibration of ULA[C]. IEEE International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering(OMEE), Lviv, Ukraine, 2012: 382-385.
- [6] Philipp H, Abdelhak Z M, and Michael R. Joint 2-D DOA estimation and phase calibration for uniform rectangular arrays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(9): 4683-4693.
- [7] 魏婵娟, 刘鹏. 一种阵列天线幅相误差校正方法设计[J]. 电子

- 设计工程, 2012, 20(24): 47-50.
- Wei Chan-juan and Liu Peng. Comparison of two adaptive anti-jamming algorithm of navigation receiver[J]. *Electronic Design Engineering*, 2012, 20(24): 47-50.
- [8] Xiao Hua, Shao Huai-zong, and Peng Qi-cong. A new calibration method for micro-phone array with gain, phase, and position errors[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 5(3): 248-251.
- [9] Lin Min and Yang Lu-xi. Blind calibration and DOA estimation with uniform circular arrays in the presence of mutual coupling[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2006, 5(1): 568-569.
- [10] 鲁祖坤, 高鹰, 肖剑, 等. 基于均匀圆阵的幅相误差自校正算法[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(1): 1-5.
- Lu Zu-kun, Gao Ying, Xiao Jian, *et al.*. Amplitude and phase error auto-calibration algorithm based on uniform circular array[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2013, 42(1): 1-5.
- [11] Zhang Yu-feng, Ma Hong, and Tan Ping. A low complexity calibration method of gain and phase error for arrays with arbitrary geometry[C]. *International Conference on Multimedia Technology*, Hangzhou, 2011: 3342-3345.
- [12] Sng Y H and Li You-ming. Fast algorithm for gain and phase error calibration of linear equi-spaced(LES) array[C]. *IEEE International Conference on Signal Processing Proceedings(ICSP)*, Beijing, 2000: 441-444.
- [13] Zhu Guang-ping, Sun Hui, and Zhang Ming-hui. Study on fast calibration of a ULA's gain and phase error[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2007, 6(2): 64-69.
- [14] 李琼, 叶中付, 徐旭. 均匀线阵中幅相及位置误差的快速校正方法[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(4): 383-388.
- Li Qiong, Ye Zhong-fu, and Xu Xu. Fast calibration method for sensor gain, phase and position uncertainties of linear equi-spaced array[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2003, 18(4): 383-388.
- [15] 贾永康, 保铮, 吴涸. 一种阵列天线阵元位置、幅度及相位误差的有源校正方法[J]. 电子学报, 1996, 24(3): 47-51.
- Jia Yong-kang, Bao Zheng, and Wu Heng. A new calibration technique with signal sources for position, gain and phase uncertainty of sensor array[J]. *Acat Electronica Sinica*, 1996, 24(3): 47-51.
- [16] Jin Rong, Li Qing-xia, Dong Jian, *et al.*. A solar calibration method for microwave aperture synthesis radiometer[C]. *IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICCMT)*, Chengdu, 2010: 1723-1726.
- [17] Jin Rong, Li Kingie, Chen Key, *et al.*. An on-board external calibration method for aperture synthesis radiometer by rotation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(5): 901-905.
- 袁自月: 女, 1990年生, 硕士生, 研究方向为综合孔径辐射计、阵列信号处理.
- 牛一鸣: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为微波毫米波近程探测技术、毫米波电路.
- 杨国: 男, 1977年生, 硕士生导师, 副研究员, 研究方向为微波毫米波近程探测技术、毫米波电路与天线.
- 吴文: 男, 1968年生, 博士生导师, 研究员, 研究方向为微毫米波主、被动复合探测技术, 毫米波、红外、激合、复合探测技术, 射频电路理论与技术和毫米波天线理论与技术等领域.