

嵌入式平面麦克风阵列 TDOA 校正方法

赵 兆, 王 旭, 许志勇

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094)

摘 要: 针对嵌入式安装麦克风阵列因壳体遮挡部分阵元而导致的实际波达时间差(TDOA)偏离直达波理论模型问题,基于实际声探测系统最常用的对称凸多边形平面阵型构造线性几何约束并结合秩2代数约束,提出了一种校正实测 TDOA 矩阵的凸优化闭式解,只要阵列结构中存在至少一对等长平行线,就能获得现有 TDOA 校正方法所没有的壳体遮挡衍射效应抑制能力,同时还能抑制随机误差和异常值的不利影响,实现复杂度低,更适用于日益普及的小型实时全向声探测系统应用. 仿真结果验证了该方法的有效性.

关键词: 麦克风阵列; TDOA 校正; 衍射传播效应; 嵌入式平面阵列; 线性几何约束; TDOA 矩阵; TDOA 异常

中图分类号: TN971 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2019)10-2235-06
电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.10.027

Correction of TDOA for Embedded Planar Microphone Arrays

ZHAO Zhao, WANG Xu, XU Zhi-yong

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

Abstract: In order to diminish the deviation of far-field time-difference-of-arrival (TDOA) measurements from the ideal line-of-sight (LOS) model due to some microphones shadowed by the system shell of an embedded planar microphone array, which is not considered and cannot be resolved by existing TDOA correction studies, a novel convex optimization method was proposed for correcting the measured TDOA matrix. A closed-form solution was obtained by integrating the rank-2 algebraic constraint with a set of linear geometric constraints corresponding to the equilateral parallel lines (EPLs) that are easily achieved in practical acoustic detection systems using approximately symmetric convex polygons as preferable array shapes. As long as the array shape contains at least one pair of linearly independent EPLs, the proposed method gains the capability of effectively suppressing the diffraction induced deviations in measured TDOAs relevant to non-line-of-sight (NLOS) array elements. Meanwhile, the adverse effects of measurement noise and TDOA outliers can be also mitigated. Considering both the above capabilities and the low computational complexity, the proposed method is more suitable for ever-growing applications of small-scale, real-time acoustic detection systems. Numerical simulations verified its effectiveness.

Key words: microphone array; time-difference-of-arrival correction; diffraction propagation effect; embedded planar array; linear geometric constraint; time-difference-of-arrival matrix; time-difference-of-arrival outlier

1 引言

精确的阵元间波达时间差(Time-Difference-Of-Arrival, TDOA)估计是麦克风阵列系统准确获取声源来向的前提和保证^[1-4],因复杂度低、环境适应性好等优势而应用广泛.受外形结构、使用运输等条件限制,许多承担户外360°全空域监测的小型声探测系统通常采用嵌入式安装的水平平面阵列结构,当远场声源俯仰角较小时,部分阵元将因壳体遮挡而不能直视目标.对于通

常远至数百米乃至数千米的户外声源目标,声信号能量因高频成分衰减更快而主要集中在低频部分,并主要借助衍射传播效应沿系统壳体绕行至非通视阵元,使得实际波达时间(Time-Of-Arrival, TOA)增大并引起相关阵元间的实际TDOA偏离全通视模型下的理想值,最终导致测向结果明显偏离真实声源方向.此外,多途传播、多源串扰等实际因素还会引起实测TDOA中出现部分异常值(outlier),测向性能将会进一步恶化.为表述方便,本文将实际嵌入式阵列系统的TDOA真实值称

为实际 TDOA, 对应理想全通视模型的 TDOA 理论值称为理想 TDOA, 两者之差称为 TDOA 增量(源自壳体衍射传播效应引起的非通视阵元 TOA 增大), TDOA 测量结果称为实测 TDOA, 其正常值应是实际 TDOA 与随机测量噪声之和, 实测 TDOA 中部分超出正常取值范围的异常值(含丢失值赋值), 称为 TDOA 异常.

实测 TDOA 校正方法分为基于模型^[5,6]和基于数据^[7-12]两种. 前者思路与头相关传递函数(Head-Related Transfer Function, HRTF)类研究^[13,14]相似, 通过理论建模或实测建库等方式事先建立实际 TDOA 与真实声源方向之间的对应模型, 探测时再通过匹配搜索方式将实测 TDOA 集合转化成声源来向估计. 但实际嵌入式麦克风阵列系统的壳体结构通常不规则, 三维空间的实测 TDOA 是声源方位角和俯仰角以及大气环境的多元复杂函数, 在系统资源稀缺和声源方向未知等条件下, 模型数据库无法穷举所有三维空间方向的实际 TDOA 集合, 精确建模不现实. 基于数据的校正方法主要根据多种理想 TDOA 集合模型的代数与几何特征, 对相同阵型的实测 TDOA 集合进行优化或筛选, 得到一组理想 TDOA 子集的估计, 进而获得较准确的声源测向结果^[15]. 其中一种典型的 TDOA 集合模型是由 N 元阵列所有 $N(N-1)/2$ 个不同 TDOA 构建的反对称 TDOA 矩阵, 研究表明利用该矩阵的低秩特性可以较好抑制实测 TDOA 中的随机测量噪声和少量 TDOA 异常^[12]. 但现有基于数据的校正方法只能恢复阵列的实际 TDOA, 没有考虑也无法校正壳体遮挡衍射效应造成的 TDOA 增量, 因而不能消除嵌入式阵列系统的测向偏差.

全通视条件下等长平行线两端阵元之间的远场理想 TDOA 相等且与声源方向无关. 根据这一特性, 本文基于阵列形状中存在的等长平行线构建线性几何约束, 连同秩 2 代数约束一起推导用于校正嵌入式平面阵列 TDOA 矩阵的闭式解, 既能同时抑制壳体遮挡衍射效应、随机测量噪声、测量异常值的不利影响, 保证远场测向准确性, 还能避免现有迭代优化算法的收敛与耗时不确定性, 更适合实时处理应用. 考虑到实际全方位声探测系统为保证各向测角性能的一致性, 通常会尽量采用近似均匀分布的对称凸多边形阵型^[4], 在真实平面阵结构中保证至少一对等长平行线比较容易实现. 因此, 本文研究具有一定普适性和实用性, 可作为嵌入式平面麦克风阵列系统阵型与结构设计的参考.

2 问题描述

给定一个平面麦克风阵列, 包含 N 个全向阵元, 设第 i 个阵元 A_i 的位置坐标 $\mathbf{r}_i = [r_{ix}, r_{iy}, 0]^T, i = 1, \dots, N$, 声源位置坐标 $\mathbf{s} = [s_x, s_y, s_z]^T$. 理想全通视条件下, 声源信号沿直线传播至所有阵元, 阵元 A_i 的实际 TOA 等于理想值 τ_i

$= \|\mathbf{s} - \mathbf{r}_i\| / c, c$ 为大气声传播速度. 定义阵列的理想 TOA 矢量 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N]^T$ 和归一化全 1 矢量 $\mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1]^T / \sqrt{N}$, 可构建反对称的理想 TDOA 矩阵

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & \Delta\tau_{12} & \cdots & \Delta\tau_{1N} \\ \Delta\tau_{21} & 0 & \cdots & \Delta\tau_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta\tau_{N1} & \Delta\tau_{N2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} = \sqrt{N} \cdot (\boldsymbol{\tau}\mathbf{1}^T - \mathbf{1}\boldsymbol{\tau}^T) \quad (1)$$

式中, $\Delta\tau_{ij} = \tau_i - \tau_j$ 为阵元 i 和 j 之间的理想 TDOA. 矩阵 \mathbf{M} 包含了声源测向所需的所有 TDOA 信息, 由 $\boldsymbol{\tau} \neq \mathbf{1}$, 可得 \mathbf{M} 的秩 $\text{rank}(\mathbf{M}) = 2$. 当 $\mathbf{x} = \mathbf{M}\mathbf{1} = \sqrt{N} \cdot \boldsymbol{\tau} - s_r \cdot \mathbf{1}$ 时, 满足 $\mathbf{M} = \mathbf{x}\mathbf{1}^T - \mathbf{1}\mathbf{x}^T$, 并且 $\mathbf{x} \perp \mathbf{1}$, 因此 $\mathbf{x} = \mathbf{M}\mathbf{1}$ 可看作 TOA 矢量 $\boldsymbol{\tau}$ 的一个估计, 仅相差一个固定时延 $s_r = \sum_{i=1}^N \tau_i$, 但不改变所有的 TDOA 信息. 实际全通视阵列的实测 TDOA 矩阵可表示为

$$\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{M} + \mathbf{Q} + \mathbf{S} \quad (2)$$

其中, \mathbf{Q} 和 \mathbf{S} 分别为反对称的随机测量噪声矩阵和异常值偏差矩阵. 当 TDOA 异常数量较少时, 文献^[12]将理想 TDOA 矩阵 \mathbf{M} 的估计任务转化为如下非凸优化问题

$$\min_{\mathbf{M}, \mathbf{S}} \|\hat{\mathbf{M}} - \mathbf{M} - \mathbf{S}\|_F^2, \quad \text{s. t. } \mathbf{M} = \mathbf{x}\mathbf{1}^T - \mathbf{1}\mathbf{x}^T, \mathbf{x} \perp \mathbf{1} \quad (3)$$

并提出 Robust DeN 算法, 通过对秩 2 和异常个数两个约束子问题的交替迭代优化, 逐步收敛至 \mathbf{M} 的某个局部最优解^[12]. 式中, $\|\cdot\|_F$ 和 $\|\cdot\|_0$ 分别表示 Frobenius 范数和非零元素个数, m 为预设的 TDOA 异常个数上限. Robust DeN 算法能同时抑制 TDOA 测量噪声和少量 TDOA 异常, 但迭代次数和计算耗时不确定.

受壳体遮挡衍射传播效应影响, 嵌入式平面阵列非通视阵元的实际 TOA 大于理想值. 不妨设阵元 $A_1 \sim A_L (L \leq N)$ 处于非通视状态, 相应 TOA 增量矢量为 $\boldsymbol{\delta} = [\delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_L}, \mathbf{0}_{1 \times (N-L)}]^T, \mathbf{0}_{1 \times (N-L)}$ 表示 $(N-L)$ 维全 0 行矢量. 此时, 实测 TDOA 矩阵将与式(2)不同

$$\hat{\mathbf{M}} = \underbrace{\sqrt{N} \cdot (\boldsymbol{\tau}\mathbf{1}^T - \mathbf{1}\boldsymbol{\tau}^T)}_{\mathbf{M}} + \underbrace{\sqrt{N} \cdot (\boldsymbol{\delta}\mathbf{1}^T - \mathbf{1}\boldsymbol{\delta}^T)}_{\mathbf{E}} + \mathbf{Q} + \mathbf{S} = \tilde{\mathbf{M}} + \mathbf{Q} + \mathbf{S} \quad (4)$$

式(4)中, 实际 TDOA 矩阵 $\tilde{\mathbf{M}}$ 是理想 TDOA 矩阵 \mathbf{M} 与 TDOA 增量矩阵 \mathbf{E} 之和. 由于目标声源位置不确定、系统外壳设计不规则、环境条件不断变化等原因, 壳体遮挡衍射传播造成的 TDOA 增量矩阵 \mathbf{E} 难以实时预测或事先建模. 假设 \mathbf{H} 是包括 \mathbf{E} 在内的任意反对称秩 2 矩阵, 仅采用秩 2 约束无法分辨 \mathbf{M} 和 $\mathbf{M} + \mathbf{H}$, 即基于式(1)对 $\tilde{\mathbf{M}}$ 的秩 2 分解不唯一, 因而现有 TDOA 矩阵校正方法通常只能得到反对称秩 2 矩阵集合 $\{\mathbf{M} + \mathbf{H}\}$ 中的任意一个, 而非 \mathbf{M} 的准确重构, 即不能抑制壳体遮挡衍

射传播效应,必须施加其它约束条件才有可能获得逼近 \mathbf{M} 的全局最优解.

3 基于低秩及线性几何约束的 TDOA 矩阵校正算法

为能同时抑制实测 TDOA 中的随机噪声、异常值以及衍射传播增量,本文将式(4)中对理想 TDOA 矩阵 \mathbf{M} 的估计任务转化为如下线性约束凸优化问题:

$$\bar{\mathbf{x}} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \|\hat{\mathbf{M}} - (\mathbf{x} \cdot \mathbf{1}^T - \mathbf{1} \cdot \mathbf{x}^T)\|_{\text{F}}^2 \quad \text{s. t. } \mathbf{D}^T \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (5)$$

式(5)中, $\mathbf{0}$ 为零矢量,约束矩阵 $\mathbf{D} = [\mathbf{1}, \mathbf{C}]$ 分别对应 $\mathbf{1}^T \mathbf{x} = 0$ 和 $\mathbf{C}^T \mathbf{x} = \mathbf{0}$ 两部分,前者为秩 2 约束,用于抑制随机测量噪声,后者为有关阵列形状的线性几何约束,用于抑制异常值和衍射传播增量. 应用 Lagrange 乘数法

$$L(\mathbf{x}; \boldsymbol{\lambda}) = \|\hat{\mathbf{M}} - (\mathbf{x} \cdot \mathbf{1}^T - \mathbf{1} \cdot \mathbf{x}^T)\|_{\text{F}}^2 + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{D}^T \mathbf{x} \quad (6)$$

其中, $\boldsymbol{\lambda}$ 为 Lagrange 乘数矢量. 考虑到

$$\begin{aligned} & \|\hat{\mathbf{M}} - (\mathbf{x} \cdot \mathbf{1}^T - \mathbf{1} \cdot \mathbf{x}^T)\|_{\text{F}}^2 \\ &= \operatorname{tr}([\hat{\mathbf{M}} - (\mathbf{x} \cdot \mathbf{1}^T - \mathbf{1} \cdot \mathbf{x}^T)][\hat{\mathbf{M}} - (\mathbf{x} \cdot \mathbf{1}^T - \mathbf{1} \cdot \mathbf{x}^T)]^T) \\ & \operatorname{tr}(\cdot) \text{表示矩阵的迹,结合反对称性质 } \hat{\mathbf{M}} - \hat{\mathbf{M}}^T = 2\hat{\mathbf{M}}, \end{aligned}$$

通过式(6)对 \mathbf{x} 和 $\boldsymbol{\lambda}$ 分别求导并置 0 可得

$$\begin{cases} 4(\mathbf{I}_N - \mathbf{1} \cdot \mathbf{1}^T)\mathbf{x} - 4\hat{\mathbf{M}}\mathbf{1} + \mathbf{D}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \\ \mathbf{D}^T \mathbf{x} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (7)$$

其中 \mathbf{I}_N 为 $N \times N$ 维单位矩阵. 利用 $\mathbf{1}^T \mathbf{x} = 0$ 进一步化简,

$$\mathbf{c}_k = [0, \dots, 0, \underset{k_1\text{-th}}{1}, 0, \dots, 0, \underset{k_2\text{-th}}{-1}, 0, \dots, 0, \underset{k_3\text{-th}}{1}, 0, \dots, 0, \underset{k_4\text{-th}}{-1}, 0, \dots, 0]^T \quad (12)$$

为对应第 k 对等长平行线的线性几何约束矢量,因为 $\mathbf{c}_k^T \mathbf{1} = 0$, 线性几何约束矢量 \mathbf{c}_k 与全 1 矢量 $\mathbf{1}$ 正交,并有 $\mathbf{c}_k^T \mathbf{M}\mathbf{1} = \mathbf{c}_k^T (\sqrt{N} \cdot \boldsymbol{\tau} - \mathbf{s}_\tau \cdot \mathbf{1}) = 0$.

容易验证,如果 K 对等长平行线的端点阵元集合满足:

$$\Omega_{k_0} \not\subset \bigcup_{\substack{k=1 \\ k \neq k_0}}^K \Omega_k, \forall k_0 \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (13)$$

即其中任意一对平行线的 4 个端点阵元都不会被其余 $(K-1)$ 对平行线完全涵盖,则根据式(12)可得

$$\mathbf{c}_{k_0} \neq \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq k_0}}^K w_k \mathbf{c}_k, \forall k_0 \in \{1, 2, \dots, K\}, w_k \in \mathbb{R} \quad (14)$$

即对应这组平行线的 K 个线性几何约束矢量之间线性不相关. 令由 K 对线性无关等长平行线构建的几何约束矩阵 $\mathbf{C}_K = [\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_K]$, 则有 $\mathbf{C}_K^T \mathbf{M}\mathbf{1} = \mathbf{0}$ 和 $\mathbf{C}_K^T \mathbf{1} = \mathbf{0}$, 因而约束矩阵 $\mathbf{D} = [\mathbf{1}, \mathbf{C}_K]$ 列满秩. 由于 $\mathbf{x} = \mathbf{M}\mathbf{1}$ 是秩 2 约束下理想 TOA 矢量 $\boldsymbol{\tau}$ 的估计(相差一个固定时延), 因此矩阵 \mathbf{C}_K 满足式(5)所示约束要求. 可以预见,线性无关等长平行线的数量 K 越多,对嵌入式平面阵的 TDOA 矩阵校正效果越好.

为保证各向测角性能的一致性并降低对 TDOA 测量

得分块矩阵

$$\begin{bmatrix} 4\mathbf{I}_N & \mathbf{D} \\ \mathbf{D}^T & \mathbf{O} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4\hat{\mathbf{M}}\mathbf{1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

\mathbf{O} 为全零矩阵. 由于 $4\mathbf{I}_N$ 可逆并假设约束矩阵 \mathbf{D} 列满秩,根据分块矩阵求逆公式^[16]可得

$$\begin{bmatrix} 4\mathbf{I}_N & \mathbf{D} \\ \mathbf{D}^T & \mathbf{O} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}(\mathbf{I}_N - \mathbf{D}(\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T) & \mathbf{D}(\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \\ (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T & -4(\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

结合式(8)有

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{x}} = (\mathbf{I}_N - \mathbf{D}(\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T) \hat{\mathbf{M}}\mathbf{1} \\ \bar{\boldsymbol{\lambda}} = 4(\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \hat{\mathbf{M}}\mathbf{1} \end{cases} \quad (10)$$

令 $\mathbf{U} = \mathbf{I}_N - \mathbf{D}(\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T$, 最终可得理想 TDOA 矩阵估计的闭式表达式

$$\bar{\mathbf{M}} = \bar{\mathbf{x}} \bar{\mathbf{x}}^T - \mathbf{1} \bar{\mathbf{x}}^T = \mathbf{U} \hat{\mathbf{M}}\mathbf{1} \cdot \mathbf{1}^T + \mathbf{1} \cdot \mathbf{1}^T \hat{\mathbf{M}}\mathbf{U} \quad (11)$$

远场条件下,连线平行且等长的两对阵元对任意来向的声源都具有相等的理想 TDOA,因而可基于阵列形状中的等长平行线构建线性几何约束 \mathbf{C} . 假设平面麦克风阵列包含至少 K 对等长平行线,不妨令第 k 对平行线 $A_{k1} \rightarrow A_{k2}$ 和 $A_{k4} \rightarrow A_{k3}$ 由 4 个阵元 $\Omega_k = \{A_{k1}, A_{k2}, A_{k3}, A_{k4}\}$ 组成, Ω_k 表示第 k 对平行线的端点阵元集合. 对于任意来向的远场声源信号,总有 $\tau_{k1} - \tau_{k2} = \tau_{k4} - \tau_{k3}$, 即 $\mathbf{c}_k^T \boldsymbol{\tau} = 0$, 其中

误差的敏感度,实际平面阵列通常采用所有阵元近似均匀分布的对称凸多边形阵型结构,如平行四边形、正六边形等^[4]. 对称的凸多边形通常存在多对等长平行线,其中任意两对邻接等长平行线如果只有两个端点阵元被共享,则它们所对应的两个几何约束矢量线性不相关,从而这两对相邻平行线是线性无关的. 由此推论,任意一对线性无关平行线至少应有 2 个端点阵元不与其它对平行线共享. 由于每对平行线都有 4 个端点阵元,因此 N 元平面阵列最多存在 $(\lfloor N/2 \rfloor - 1)$ 对线性无关的等长平行线, $\lfloor x \rfloor$ 表示不大于 x 的最大整数.

根据几何原理,当阵元数 N 为偶数时,对称凸多边形最多可由 $N/2$ 对邻接的等长平行边组成;而当 N 为奇数时,为获得最多 $\lfloor N/2 \rfloor$ 对邻接等长平行边,常见阵型方案是用 $(N-1)$ 个阵元构建对称凸多边形外圈,剩余的 1 个阵元置于阵列中心. 因此,为获取最多数量的等长平行边对, N 元平面阵列外圈的阵元数应为偶数 $\lfloor N/2 \rfloor \times 2$. 由于上述 $\lfloor N/2 \rfloor$ 对邻接等长平行边已涵盖所有外圈阵元,由式(12)和式(14)可知,虽然基于非相邻阵元还可构建其他等长平行线,但这些平行线对应的几何约束矢量均是外圈 $\lfloor N/2 \rfloor$ 对邻接等长平行边线性约束矢量集的线性组合. 根据前述不难证明,对于外

圈阵元数 N 为偶数 ($N \geq 4$) 的对称凸多边形平面麦克风阵列, 最多存在 $(N/2 - 1)$ 对线性无关的等长平行边, 可构建 $(N/2 - 1)$ 维列满秩的线性几何约束矩阵 \mathbf{C} , 满足 $\mathbf{C}^T \mathbf{M} \mathbf{1} = \mathbf{0}$ 和 $\mathbf{C}^T \mathbf{1} = \mathbf{0}$, 即实际嵌入式平面阵列的线性几何约束可通过外圈的线性无关等长平行边构建。

4 数值仿真实验

为验证 TDOA 校正性能, 本文以八元平面阵为例开展数值仿真实验, 并与能同时抑制 TDOA 测量噪声和少量 TDOA 异常的 Robust DeN 算法^[12]作对比。如图 1 所示, 8 个阵元的二维坐标分别为 $A_1(3, 4)$ 、 $A_2(4, 1)$ 、 $A_3(4, -2)$ 、 $A_4(2, -4)$ 、 $A_5(-3, -4)$ 、 $A_6(-4, -1)$ 、 $A_7(-4, 2)$ 、 $A_8(-2, 4)$, 单位为 cm。

仿真实验中, 远场声源处于阵列所在平面, 声速设为 $c = 340\text{m/s}$ 。TDOA 矩阵校正性能采用残余误差-信号功率比 (Residual Error to Signal Ratio, RESR) 指标评估

$$\text{RESR} = 10 \lg \left(\frac{\|\bar{\mathbf{M}} - \mathbf{M}\|_F^2}{\|\mathbf{M}\|_F^2} \right) \quad (15)$$

式中, \mathbf{M} 为理想 TDOA 矩阵, $\bar{\mathbf{M}}$ 为基于实测 TDOA 矩阵 $\hat{\mathbf{M}}$ 进行校正处理后的结果矩阵。当 $\bar{\mathbf{M}} = \hat{\mathbf{M}}$ 时, 上式计算结果将是被用作性能比较基准的 RESR 初始值。考虑到实际阵列系统的壳体外形往往比较复杂且不规则, 极端情况下壳体遮挡衍射效应将会造成几乎所有阵元的实际 TOA 均偏离理想值, 因此针对不同数量的非通视阵元 ($i = 0 \sim 8$) 和 TDOA 异常 ($j = 0 \sim 8$) 分别进行 1000 次独立随机实验, 再取平均结果。根据 3.2 节, 八元阵列最多存在 3 个线性无关的几何约束条件, 因而实验中针对 C_{\min} 和 C_{\max} 两种不同维数的几何约束条件情况, 分别考察仅随机选择 1 对等长平行线和采用全部 3 对线性无关等长平行边时的 TDOA 矩阵校正性能。

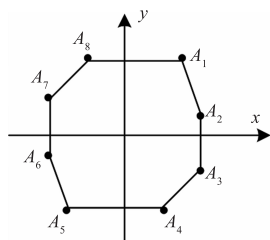


图1 八元平面阵示意图

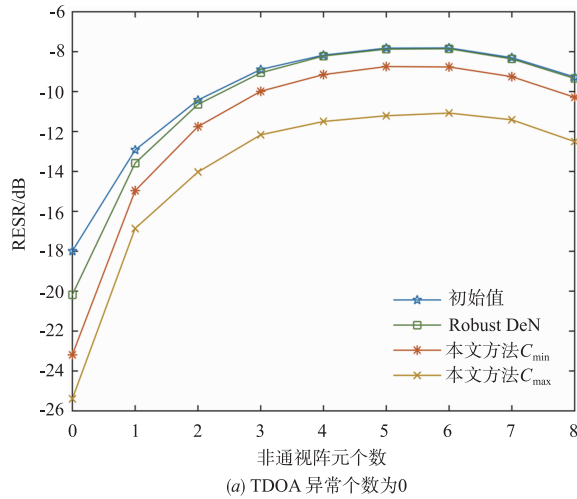
每次实验中, 在 $[0^\circ, 360^\circ)$ 范围内随机选取声源方位角, 然后基于理想全通视 TOA 矢量 $\boldsymbol{\tau}$ 随机选择其中 i 个元素作为非通视阵元, 分别添加 $[0, 0.117\text{ms}]$ 区间中均匀分布的随机 TOA 偏差, 模拟实际 TOA 矢量, 再根据式(1)构建实测 TDOA 矩阵。其中, 0.117ms 是声波沿外壳绕行传播的实际 TOA 与通视直线传播的理想 TOA 之间的最大可能偏差。TDOA 随机测量噪声采用 0 均值、 0.023ms 标准差的独立高斯白噪声, 少量 TDOA 异

常则通过在总计 28 个不同 TDOA 中随机选择 j 个替换为均值为 0、标准差为 0.1ms 的独立高斯白噪声实现 (参数同文献[12], 且与理想 TDOA 无关)。Robust DeN 方法要求预设的 TDOA 异常个数上限均设为 8。

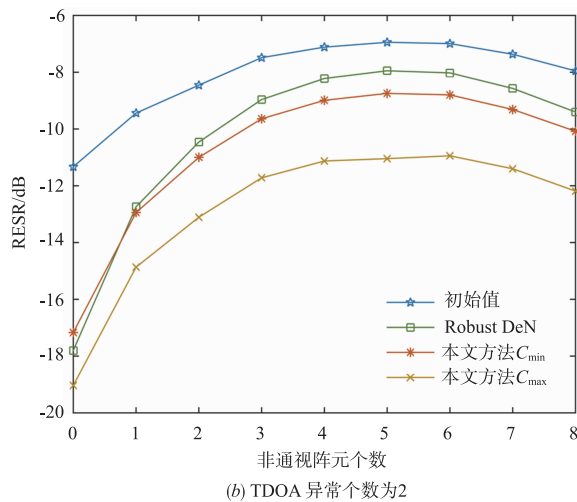
图 2 给出了 TDOA 异常个数 j 分别为 0、2、4 时本文方法和 Robust DeN 方法的 TDOA 矩阵校正性能随非通视阵元个数 i 的变化曲线。对比图 2(a) ~ (c), 在全通视理想情况时, 随着 TDOA 异常个数增加, Robust DeN 方法的 RESR 性能相对于初始值的提升由 2dB 逐渐增加到约 8dB, 表明该方法能够有效抑制少量 TDOA 异常的不利影响; 但当 TDOA 异常个数固定时, 其 RESR 性能提升效果却会随着非通视阵元个数的增加而逐渐下降, 尤其是在没有 TDOA 异常时, 性能提升甚至可被忽略, 表明 Robust DeN 方法不能消除非通视阵元的 TOA 偏差。与之不同, 当不存在非通视阵元时, 本文方法在 C_{\min} 和 C_{\max} 两种条件下的 RESR 性能相对于初始值的提升分别稳定在 5dB 和 7dB 左右, 且在不同 TDOA 异常个数时都比较稳健, 表明只要存在至少 1 个线性几何约束, 本文方法就能有效抑制 TDOA 随机测量噪声和 TDOA 异常; 而当给定 TDOA 异常个数时, 本文方法的 RESR 性能在至少有 2 个非通视阵元时都优于甚至明显优于 Robust DeN 方法, 表明本文方法还同时具备对非通视阵元 TOA 偏差的校正能力, 并且校正性能随线性无关几何约束条件数量的增加而提升。

考虑到图 1 所示嵌入式八元平面阵在实际中由于壳体遮挡而出现多达 4 个非通视阵元的情况是大概率事件, 图 3 比较了存在 4 个非通视阵元时两种方法在不同 TDOA 异常个数下的 TDOA 矩阵校正效果。可以看出, 当没有 TDOA 异常时, Robust DeN 方法的 RESR 性能相对于初始值的提升很有限, 并且其 RESR 曲线随着 TDOA 异常数量的变化仅有轻微波动, 表明该方法能有效抑制 TDOA 异常, 但却不能消除非通视阵元固有 TOA 偏差的影响。与之相比, 虽然本文方法的 RESR 曲线会随 TDOA 异常个数的增加而逐渐增大, 即对于 TDOA 异常数量的敏感度高于 Robust DeN 方法, 但本文方法在 C_{\max} 条件下的性能明显优于 Robust DeN 方法, 同时即使存在多达 6 个 TDOA 异常, 本文方法在 C_{\min} 条件下的 RESR 曲线也仍然低于 Robust DeN 方法, 表明本文方法的性能提升主要源自对非通视阵元 TDOA 偏差的校正, 同时兼顾对 TDOA 异常的部分抑制。

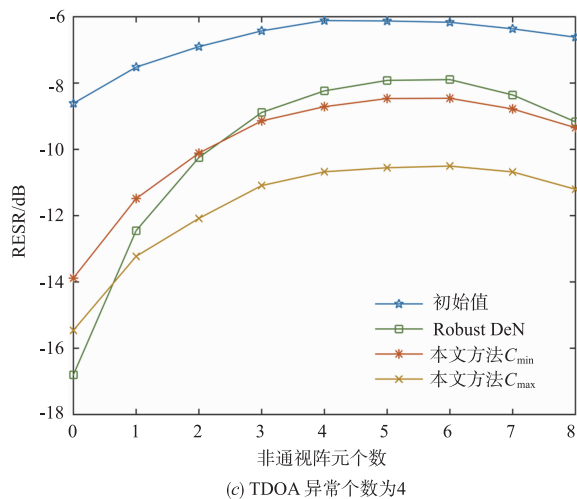
实际应用中, 实测 TDOA 矩阵含有的异常值个数相对较少, 但对嵌入式平面阵而言, 出现壳体遮挡衍射传播导致的非通视阵元 TOA 增量却是不可避免的。因此综合图 2、图 3 所示结果, 当同时存在非通视阵元 TOA 偏差、TDOA 随机测量噪声以及少量 TDOA 异常时, 只要阵列形状中含有至少一对等长平行线, 本文方



(a) TDOA 异常个数为0



(b) TDOA 异常个数为2



(c) TDOA 异常个数为4

图2 不同TDOA异常个数时TDOA矩阵校正性能随非通视阵元个数的变化曲线对比

法的 TDOA 矩阵校正性能就可优于现有方法,并且校正能力随着线性无关等长平行线数量的增加而提升。

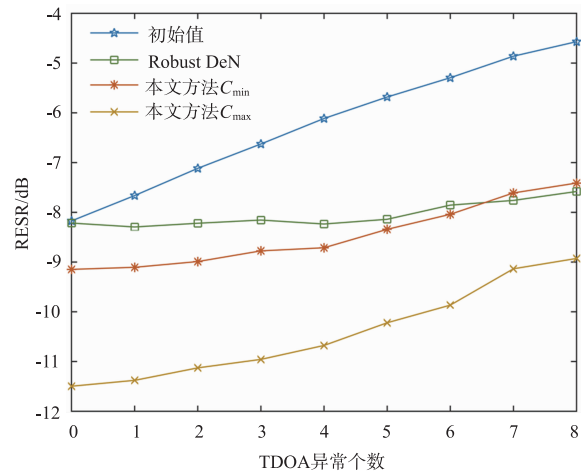


图3 存在4个非通视阵元时

TDOA矩阵校正性能随TDOA异常个数的变化曲线对比

对于给定的平面麦克风阵列,线性几何约束矩阵 C 是已知的,且与声源来向无关,式(11)所示 TDOA 矩阵校正公式中的正交投影矩阵 U 可预先计算并存储,因而本文方法的实际计算复杂度不高,最大处理耗时可事先预测,相比于 Robust DeN 等非凸迭代优化方案,本文方法更适合实时处理应用需求。

5 结论

嵌入式平面麦克风阵列在全空域远场测向应用中,阵元间实际 TDOA 会因系统壳体遮挡衍射传播效应而偏离全通视模型理想值. 为能同时抑制 TDOA 实测值中壳体遮挡衍射效应、随机测量误差以及测量异常值的不利影响,在现有秩 2 代数约束基础上再施加线性几何约束,得到了能有效校正实测 TDOA 矩阵的凸优化闭式解. 对于实际中最常用的对称凸多边形阵型结构,线性几何约束矩阵可通过阵列外圈的线性无关等长平行线构建. 数值仿真表明,只要嵌入式阵列结构中存在至少一对等长平行线,本文方法就具备现有方法所没有的非通视阵元 TDOA 偏差抑制能力,同时兼顾对 TDOA 异常的抑制,不仅对实测 TDOA 的校正性能更优,而且实际计算复杂度低,处理耗时可预测. 鉴于本文方法的校正性能随线性无关等长平行线对数的增加而提升,建议在实际嵌入式平面麦克风阵列系统设计时也同时考虑该因素,以获取更优的理想全通视 TDOA 估计和远场测向性能。

参考文献

- [1] Lombard A, Zheng Y H, Buchner H, et al. TDOA estimation for multiple sound sources in noisy and reverberant environments using broadband independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language

- Processing, 2011, 19(6): 1490 – 1503.
- [2] Blandin C, Ozerov A, Vincent E. Multi-source TDOA estimation in reverberant audio using angular spectra and clustering [J]. Signal Processing, 2012, 92(8): 1950 – 1960.
- [3] 闫青丽, 陈建峰. 分布式声源定位系统节点最优布局方法及性能研究 [J]. 电子学报, 2018, 46(5): 1186 – 1193.
Yan Qing-li, Chen Jian-feng. Node placement optimization for distributed acoustic source localization system and performance study [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(5): 1186 – 1193. (in Chinese)
- [4] 许志勇, 赵兆. 平面阵声源方位角估计扰动敏感性分析 [J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(4): 105 – 110.
Xu Zhi-yong, Zhao Zhao. Perturbation sensitivity analysis on azimuth estimation of acoustic source for planar microphone array [J]. Journal of Xidian University, 2017, 44(4): 105 – 110. (in Chinese)
- [5] Kim U H, Nakadai K, Okuno H G. Improved sound source localization in horizontal plane for binaural robot audition [J]. Applied Intelligence, 2015, 42(1): 63 – 74.
- [6] Zhong X, Sun L, Yost W. Active binaural localization of multiple sound sources [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 85: 83 – 92.
- [7] Scheuing J, Yang B. Disambiguation of TDOA estimates in multi-path multi-source environments (DATEMM) [A]. ICASSP 2006 [C]. Toulouse, France: IEEE, 2006. 837 – 840.
- [8] Scheuing J, Yang B. Efficient synthesis of approximately consistent graphs for acoustic multi-source localization [A]. ICASSP 2007 [C]. Honolulu, USA: IEEE, 2007. 501 – 504.
- [9] Scheuing J, Yang B. Disambiguation of TDOA estimation for multiple sources in reverberant environments [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2008, 16(8): 1479 – 1489.
- [10] Le T-K, Ono N. Refinement of time-difference-of-arrival measurements via rank properties in two-dimensional space [A]. Proceedings of the 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) [C]. Kos, Greece: EURASIP, 2017. 1971 – 1975.
- [11] Le T-K, Ho K C, Le T-H. Rank properties for matrices constructed from time differences of arrival [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(13): 3491 – 3503.
- [12] Velasco J, Pizarro D, Macias-Guarasa J, et al. TDOA matrices: Algebraic properties and their application to robust denoising with missing data [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(20): 5242 – 5254.
- [13] 余光正, 刘昱, 谢波菽. 近场头相关传输函数的多声源快速测量系统设计与验证 [J]. 声学学报, 2017, 42(3): 348 – 360.
- Yu Guang-zheng, Liu Yu, Xie Bo-sun. Design and validation on a multiple sound source fast measurement system of near-field head-related transfer functions [J]. Acta Acoustica, 2017, 42(3): 348 – 360. (in Chinese)
- [14] 黄婉秋, 曾向阳, 王蕾. 基于多维生理参数的头相关传递函数个人化方法 [J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(2): 281 – 286.
Huang Wan-qi, Zeng Xiang-yang, Wang Lei. Personalization method for HRTF based on multi-dimensional physiological parameters [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(2): 281 – 286. (in Chinese)
- [15] Alameda-Pineda X, Horaud R. A geometric approach to sound source localization from time-delay estimates [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2014, 22(6): 1082 – 1095.
- [16] 张贤达. 矩阵分析与应用 [M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 95, 106.
Zhang Xian-da. Matrix Analysis and Applications (2nd Edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. 95, 106. (in Chinese)

作者简介



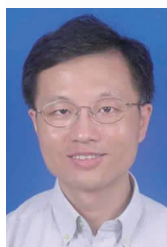
赵兆男, 1979年8月生于湖北省襄阳市. 现为南京理工大学电子工程与光电技术学院副教授. 主要研究方向为声探测系统与信号处理.

E-mail: zhaozhao@njust.edu.cn



王旭男, 1995年7月生于安徽省宿州市. 南京理工大学硕士研究生. 主要研究方向为声探测系统与信号处理.

E-mail: 116104000650@njust.edu.cn



许志勇(通信作者)男, 1968年6月生于江苏省南京市. 现为南京理工大学电子工程与光电技术学院副教授、博士生导师. 主要研究方向为阵列信号处理、大气声探测技术.

E-mail: ezyxu@mail.njust.edu.cn